

可拓学在矿井瓦斯爆炸安全评价中的应用

朱祎君¹, 叶青^{1,2}, 王永³

- (1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;
2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;
3. 中国矿业大学 资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘要:运用可拓学对瓦斯爆炸三要素进行定性和定量分析,考虑到矿井空气中氧浓度一般都能满足瓦斯爆炸所需的浓度,只要具体分析瓦斯浓度和引火源两项评价指标.通过建立评价物元模型和计算各监测巷道评价指标的关联函数与综合关联度并确定其隶属度,准确预测矿井各监测地点瓦斯爆炸倾向程度以及爆炸发生的等级距离,进而有效预防和控制瓦斯爆炸事故的发生.以郑州煤炭工业(集团)有限责任公司大平煤矿为例,运用可拓学对其瓦斯爆炸发生的倾向程度进行了验证.

关键词:可拓学;物元模型;关联函数;瓦斯爆炸倾向程度;安全评价

中图分类号:TD712 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2015)03-0026-06

Application of extenics into safety evaluation of mine gas explosion

ZHU Yijun¹, YE Qing^{1,2}, WANG Yong³

- (1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
3. School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper uses the extenics to analyze the three elements of gas explosion qualitatively and quantitatively. Generally speaking, the concentration of oxygen can meet the concentration of the explosion needed in air of mine, so this paper specifically analyzes the two indexes of the concentration gas and fire. The establishment of matter - element model is used to calculate the functions of correlation and the comprehensive correlation degree, and to determine the membership degree, and then to predict the tendency degree of gas explosion in mines and the distance to the level of the explosion accurately. So, it can prevent and control the gas explosion accidents from happening effectively. This paper, by taking the Daping Coal Mine of Zhengzhou Coal Industry Group Co. Ltd. as an example, uses the extenics to verify its tendency degree of gas explosion.

Key words: extenics; matter - element model; correlation functions; mine gas explosion tendency degree; safety evaluation

瓦斯爆炸是煤矿主要灾害之一,给生产工作人员的生命财产安全带来毁灭性的破坏,严重制约着煤炭行业的发展.判定矿井瓦斯爆炸发生倾向程度对煤矿安全生产至关重要,对其进行安全评价必须要有科学性、及时性和准确性.瓦斯爆炸必须具备3个条件:一定浓度的瓦斯(5%~16%);一定浓度的氧气(12%~20%)和一定温度的引火源(一般情况下大于650℃).矿井瓦斯浓度是时刻变化着的一种动态影

收稿日期:2015-01-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51374003;51004048)

通信作者:叶青(1975-),男,江西贵溪人,博士(后),副教授,研究方向:南方煤矿灾害预防与控制. E-mail: cumtyeqing@126.com

响过程,煤矿监测监控系统必须时刻记录各监测点瓦斯浓度变化情况.在违章爆破或是电气设备失爆等突发状况下,可能导致火花的出现,而井下空气中的氧浓度一般情况下都足以达到瓦斯爆炸所需的浓度.因此,评价矿井瓦斯爆炸是否会发生的2个主要指标是瓦斯浓度和引火源.应用可拓学对矿井瓦斯爆炸三要素进行定性和定量分析评价,为矿井瓦斯爆炸倾向程度的安全评价提供了一条新的思路和途径^[1].

1 可拓学基本原理

可拓学是数学、哲学与工程学交叉的一门新兴的横断学科.它用形式化模型研究事物拓展的可能性和开拓创新的规律与方法,并用于处理矛盾问题^[2].通过可拓转换使看似矛盾双方转化为相互统一的一面,化不相容为相容^[3,4].它以物元为基础建立物元模型来描述矛盾问题,以物元可拓性为依据,以物元变换作为解决矛盾问题的手段,并在可拓集合中,通过建立关联函数对事物的量变和质变过程进行定量描述,即利用可拓域和零界元素对事物的量变和质变进行定量化的描述^[5,6].

1.1 物元分析

在可拓学中,建立了物元、事元、关系元(统称基元)等作为可拓学的逻辑细胞,是物元的三要素.它以有序三元组 $R = (N, C, V)$ 表示,其中 N 为事物研究对象(矿井瓦斯爆炸倾向程度), C 为特征(瓦斯爆炸要素指标), V 为 N 关于 C 的量值(要素指标量化的取值范围).若 N 和 V 是参数 t 的函数, R 为参变物元,记为 $R(t) = (N(t), C, V(t))$,其中 $V(t) = C(N(t))$,物 N 的 n 个特征 C_1, C_2, \dots, C_n 及 N 关于 $C_i (i=1, 2, \dots, n)$ 对应的量值 V_i 所构成的阵列

$$R(t) = \begin{bmatrix} N(t) & c_1 & v_1(t) \\ & c_2 & v_2(t) \\ & \dots & \dots \\ & c_n & v_n(t) \end{bmatrix} = (N(t), C, V(t)).$$

在确定的时刻,物 N 的全征物元是唯一的.

同征物元 $R_m = (N_m, C, V_m)$, R_1, R_2, \dots, R_m 为 m 个同征 (c_1, c_2, \dots, c_n) 物元.对于待评矿山瓦斯爆炸安全级别分为 m 种,本论文将它分为3种,即 R_1 安全、 R_2 临界(威胁)、 R_3 危险3个等级为同征物元.

1.2 经典域

经典域即为待评价对象的评价指标 C_i 的取值范围 $V_{ji} = (a_{ji}, b_{ji})$,用矩阵表示为

$$R_j = (N_j, C_i, V_{ji}) = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & v_{j1} \\ & c_2 & v_{j2} \\ & \dots & \dots \\ & c_n & v_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & (a_{j1}, b_{j1}) \\ & c_2 & (a_{j2}, b_{j2}) \\ & \dots & \dots \\ & c_n & (a_{jn}, b_{jn}) \end{bmatrix}.$$

$R_j (j=1, 2, \dots, m)$ 为特征 C_i 的第 j 个等级, (a_{ji}, b_{ji}) 是 N_j 关于特征 C_i 的取值范围,即 $V_{ji} = (a_{ji}, b_{ji})$,其中 $i=1, 2, \dots, n$.

1.3 节域

节域即为评价指标 C_i 在 P 条件下的取值范围,其中 P 为安全等级的全体,矩阵表示为

$$R_p = (P, C_i, V_{ip}) = \begin{bmatrix} P & c_1 \\ & c_2 \\ & \dots \\ & c_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & c_1 & (a_{1p}, b_{1p}) \\ & c_2 & (a_{2p}, b_{2p}) \\ & \dots & \dots \\ & c_n & (a_{np}, b_{np}) \end{bmatrix}.$$

$V_{ip} (i=1, 2, \dots, n)$ 为评价指标 C_i 在条件 P 下所取的量值范围,即节域 (a_{ip}, b_{ip}) .

1.4 待评物元

将影响待评矿山瓦斯爆炸安全等级的要素指标的作用分值用物元 R 表示,称为矿山瓦斯爆炸安全等级水平的待评物元.用矩阵表示

$$R = (N, C, V) = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \dots & \dots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & \text{瓦斯浓度}(c_1) & \text{浓度值}(v_1) \\ & \text{引火源}(c_2) & \text{可能性}(v_2) \end{bmatrix}.$$

评价指标 C 为瓦斯爆炸的三要素,考虑到矿井空气中氧浓度一般都能达到瓦斯爆炸所需的氧浓度,因此,评价指标有 C_1 (瓦斯浓度), C_2 (引火源).

1.5 关联函数

在可拓数学中,用关联函数来描述论域中的元素具有某种性质的程度.它能定量地、客观地表述元素具有某种性质的程度及其量变和质变的过程.待评对象第 i 个特征与各类距的关联函数表示为

$$K_j(x_i) = \begin{cases} -\rho(x_i, X_{ij})/|X_{ij}|; & (x_i \in X_{ij}) \\ \rho(x_i, X_{ij})/[\rho(x_i, X_{ip}) - \rho(x_i, X_{ij})]. & (x_i \notin X_{ij}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{式中, } |X_{ij}| = |a_{ij} - b_{ij}|, \begin{cases} \rho(x_i, X_{ij}) = |x_i - (a_{ij} + b_{ij})/2| - (b_{ij} - a_{ij})/2; \\ \rho(x_i, X_{ip}) = |x_i - (a_{ip} + b_{ip})/2| - (b_{ip} - a_{ip})/2. \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$$

1.6 综合关联度

综合关联度反映待测样本对于不同等级的接近程度.待测对象对于 N_j 属于 j 类等级的关联度 $K(N_j)$ 为

$$K(N_j) = \sum_{i=1}^n a_i k_j(x_i). \quad (2)$$

式中, a_i :评价指标的权重系数且 $\sum a_i = 1, (i = 1, 2, \dots, n)$; $K(N_j)$:待测样本各指标关于各等级的关联度在考虑指标重要程度情况下的组合值,表示评价对象 P 属于危险等级 N_j 的程度.若

$$K(N_m) = \max\{K(N_j)\}. \quad (3)$$

($j = 1, 2, \dots, m$),则对象 N_m 较优,即待评对象属于等级 N_m .

2 可拓学在矿井瓦斯爆炸倾向程度评价的应用

2.1 煤矿概况

大平煤矿隶属于郑州煤炭工业(集团)有限责任公司,属国有重点煤矿.2003年瓦斯鉴定结果:绝对瓦斯涌出量 $26.16 \text{ m}^3/\text{min}$,相对瓦斯涌出量 $11.47 \text{ m}^3/\text{t}$,为高瓦斯矿井.煤层具有爆炸性,爆炸指数为 16.2% 且煤层不易自燃.矿井布置有 2 个采煤工作面,5 个掘进工作面和 3 个岩巷掘进工作面.井下建立了瓦斯抽放系统,在 13 和 16 这 2 个采区进行了瓦斯抽采,矿井装有 KJ90 安全监控系统^[7].

2004 年 10 月 20 日 22 时 9 分,21 岩石下山发生煤与瓦斯突出事故,突出瓦斯逆流进入西大巷主要风流,经西大巷逆流到 13 采区各巷道.煤与瓦斯突出前后各监测地点瓦斯浓度变化见表 1.

表 1 突出前后各监测地点瓦斯浓度变化

编号	瓦斯监测地点	突出前瓦斯浓度/%	突出后瓦斯浓度/%
1	21 岩石下山掘进工作面回风巷	0.12	40.00
2	西大巷	0.08	10.60
3	13051 上付巷	0.11	4.00
4	13121 工作面回风巷	0.15	7.35
5	1976 回风大巷(运输巷)	0.18	6.30

2.2 评价指标的量化、权重系数及分级标准的确定

在矿井空气中氧气浓度一般满足瓦斯爆炸所需的氧气浓度的情况下,只需考虑瓦斯浓度 C_1 和引火源 C_2 这 2 项指标.瓦斯发生爆炸三要素缺一不可,缺少任一个要素,瓦斯爆炸都不会发生.因此 2 个要素评价指标 C_1, C_2 的权重系数 a_1, a_2 各取 0.5,即 $a_1 = a_2 = 0.5$.

《煤矿安全规程》规定甲烷传感器报警浓度、断电浓度、复电浓度和断电范围必须符合表2规定^[8,9]

表2 甲烷传感器报警浓度、断电浓度、复电浓度和断电范围

甲烷传感器设置地点	报警浓度	断电浓度	复电浓度	断电范围
高瓦斯和煤(岩)与瓦斯突出矿井采煤工作面回风巷	≥1.0% CH ₄	≥1.0% CH ₄	<1.5% CH ₄	工作面及其回风巷内全部非本质安全型电气设备
高瓦斯和煤(岩)与瓦斯突出矿井煤巷、半煤岩巷和有瓦斯涌出的岩巷掘进工作面回风流中	≥1.0% CH ₄	≥1.0% CH ₄	<1.0% CH ₄	掘进巷道内全部非本质安全型电气设备
高瓦斯矿井进风的主要运输巷道使用架线电机车时的装煤点和瓦斯涌出巷道的下风流处	≥0.5% CH ₄	≥0.5% CH ₄	<0.5% CH ₄	装煤点处、瓦斯涌出巷道上风流100m内及其下风流的架线电源和全部非本质安全型电气设备

瓦斯爆炸浓度为5%~16%,大于16%时只发生瓦斯燃烧不发生瓦斯爆炸.考虑到井下空气中瓦斯浓度在时间和空间上分布不均且时刻在变化,测定仪器有一定的误差,瓦检人员存在读数误差.因此,把各瓦斯监测地点的报警浓度一下作为安全浓度;报警浓度以上到瓦斯爆炸下限同时和爆炸上限以上浓度作为威胁状态下的瓦斯浓度;(5.0%~16%)作为危险浓度.

井下的一切高温热源都可以引起瓦斯燃烧或爆炸,但主要引火源是违章爆破和机电设备失爆产生的火花,瓦斯爆炸大部分发生在采掘工作面^[10].因此,把(0~33)表示无违章爆破和机电设备在安全防护有效等且无其他火源存在的情况;(33~67)表示介于无引爆火源存在与出现引爆火源之间的一种安全隐患状态;(67~100)违章爆破、机电设备失爆或其他情况引起火花的出现.各单因素评价指标将瓦斯爆炸倾向程度分为3个等级,即I级(安全)、II级(威胁)、III级(危险).各监测地点评价指标量化分级详见表3.

表3 各监测地点评价指标量化分级

监测地点	安全浓度/%	威胁浓度/%	危险浓度/%	引火源出现情况
21 岩石下山掘进工作面回风巷	(0.0~1.0)	(1.0~5.0)(16~100)	(5~16)	22
西大巷	(0.0~0.5)	(0.5~5.0)(16~100)	(5~16)	63
13051 上付巷	(0.0~1.0)	(1.0~5.0)(16~100)	(5~16)	20
13121 工作面回风巷	(0.0~1.0)	(1.0~5.0)(16~100)	(5~16)	35
1976 回风大巷(运输巷)	(0.0~1.0)	(1.0~5)(16~100)	(5~16)	58

指标归一化、无量纲处理,得到经典域同征物元体 R_m 和节域物元体 R_p .

$$R_m = \begin{bmatrix} N & N_1 & N_2 & N_3 \\ C & V_1 & V_2 & V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & (0,0.5\%) & (0.5\%,5\%)(16\%,1) & (5\%,16\%) \\ C_2 & (0,1.0\%) & (1.0\%,5\%)(16\%,1) & (5\%,16\%) \\ C_2 & (0,0.33) & (0.33,0.67) & (0.67,1) \end{bmatrix};$$

$$R_p = (P, C, V) = \begin{bmatrix} P & C & N \\ C_1 & (0,1) \\ C_2 & (0,1) \end{bmatrix}.$$

2.3 关联函数、综合关联度的计算及评价结果的分析

21 岩石下山发生煤与瓦斯突出事故之前各监测地点的待测物元体 R_{befor}

$$R_{\text{befor}} = (P, C, x) = \begin{bmatrix} P & C & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ C_1 & 0.12\% & 0.08\% & 0.11\% & 0.15\% & 0.18\% \\ C_2 & 0.22 & 0.63 & 0.20 & 0.35 & 0.58 \end{bmatrix}.$$

将 R_{befor} 里的评价指标量值代入式(1)和式(2),以第一组数据为例:

$$K_{11}(N_1) = - \frac{|0.12\% - (1.0\% + 0)/2| - (1.0\% - 0)/2}{|1.0\% - 0|} = 0.120;$$

$$K_{12}(N_1) = - \frac{|0.22 - (0.33 + 0)/2| - (0.33 - 0)/2}{|0.33 - 0|} = 0.333;$$

$$K(N_1) = a_1 K_{11}(N_1) + a_2 K_{12}(N_1) = 0.5(0.120 + 0.333) = 0.225;$$

$$K_{11}(N_2) = \frac{|0.12\% - (1\% + 5\%)/2| - (5\% - 1\%)/2}{|0.12\% - (1 + 0)/2| - (1 - 0)/2 - A} = -0.880;$$

$$A = |0.12\% - (1\% + 5\%)/2| - (5\% - 1\%)/2.$$

同理, $K_{12}(N_2) = -0.333, K_1(N_2) = -0.611, K_2(N_2) = -0.663$, 因 $K_1(N_2) > K_2(N_2)$, 取 $K(N_2) = K_1(N_2) = -0.611, K(N_3) = -0.842, K(N_1) > K(N_2) > K(N_3)$, 由式(3)可知, 此监测地点隶属于 I 级(安全). 各监测地点煤与瓦斯突出前关联度 $K(N_j)$ 计算及评价结果详见表 4.

表 4 大平矿测定地点煤与瓦斯突出前关联度 $K(N_j)$ 计算及评价结果

编号	测定地点	关联度 $K(N_j)$			$\max\{K(N_j)\}$	隶属度
		$K(N_1)$	$K(N_2)$	$K(N_3)$		
1	21 岩石下山掘进工作面回风巷	0.225	-0.611	-0.824	$K(N_1)$	I 级
2	西大巷	-0.144	-0.361	-0.432	$K(N_1)$	I 级
3	13051 上付巷	0.252	-0.642	-0.840	$K(N_1)$	I 级
4	13121 工作面回风巷	0.048	-0.396	-0.724	$K(N_1)$	I 级
5	1976 回风大巷(运输巷)	-0.097	-0.278	-0.570	$K(N_1)$	I 级

煤与瓦斯突出事故发生之后各监测地点的待测物元体 R_{later}

$$R_{later} = (P, C, x) = \begin{bmatrix} P & C & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ C_1 & 40.00\% & 10.06\% & 4.00\% & 7.35\% & 6.30\% \\ C_2 & 0.22 & 0.88 & 0.20 & 0.35 & 0.58 \end{bmatrix}.$$

同理将 R_{later} 里的数据代入式(1)~式(3), 各监测地点评价结果详见表 5.

表 5 大平矿测定地点煤与瓦斯突出后关联度 $K(N_j)$ 计算及评价结果

编号	测定地点	关联度 $K(N_j)$			$\max\{K(N_j)\}$	隶属度
		$K(N_1)$	$K(N_2)$	$K(N_3)$		
1	21 岩石下山掘进工作面回风巷	-0.081	-0.024	-0.420	$K(N_2)$	II 级
2	西大巷	-0.655	-0.487	0.428	$K(N_3)$	III 级级
3	13051 上付巷	-0.018	-0.072	-0.451	$K(N_1)$	I 级
4	13121 工作面回风巷	-0.259	-0.092	-0.137	$K(N_2)$	II 级
5	1976 回风大巷(运输巷)	-0.415	0.047	-0.029	$K(N_2)$	II 级

在煤与瓦斯突出发生前, 各监测地点瓦斯爆炸可能性评价结果的隶属度均隶属 I 级(安全), 瓦斯爆炸发生的可能性很小, 矿井处于较安全状态. 22 时 9 分 21 岩石下山掘进工作面发生了特大煤与瓦斯突出后, 大量瓦斯进入此巷道, 21 岩石下山掘进工作面回风巷瓦斯浓度突增到 40.00%, 突出瓦斯经此巷道逆流到其他临近各巷道, 造成各巷道瓦斯突增到瓦斯爆炸浓度范围. 此时煤矿负责人必须立即响应应急预案, 停止井下作业, 切断电源, 撤出工作人员, 同时加强通风, 加速瓦斯排放, 警戒禁火管理, 营救被埋人员. 一旦出现火花等引火源将引起瓦斯爆炸事故. 该矿在煤与瓦斯突出发生后的 31 min 时间里并未及时采取有效预警应急措施, 22 时 40 分, 在西大巷与 11 轨道石门交汇点附近的西大巷内由架线电机车电火花的出现, 引起瓦斯爆炸, 爆炸高温热源和冲击波在巷道传播过程中引起其它巷道发生瓦斯爆炸, 事故造成 148 人死亡, 35 人受伤, 直接经济损失 3 935.7 万元, 属特别重大事故. 西大巷瓦斯突增到爆炸浓度范围

内,引火源的出现使评价指标 C_2 由 0.63 增加到 0.88,此监测地点评价结果隶属 III 级(危险),准确验证了此巷道发生瓦斯爆炸的可能性.

3 结论

1)在矿井各巷道中氧气浓度一般能满足瓦斯爆炸所需的浓度,将影响瓦斯爆炸的另外 2 要素:瓦斯浓度和引火源作为评价指标,有利于减小评价的复杂程度同时也较客观和准确地对其进行安全评价.

2)运用可拓学原理对煤矿瓦斯爆炸倾向程度进行评价,通过对评价指标量化处理,建立可拓评价模型,较准确地判定矿井瓦斯爆炸倾向程度发生的等级及与各等级的安全距离,有一定的科学实用价值,为预测和判定矿井瓦斯爆炸倾向程度提供了一种新的方法和途径.

参考文献:

- [1] 郭德勇,郑茂杰,郭超,等.煤与瓦斯突出预测可拓类聚方法及应用[J].煤炭学报,2009,34(6):783-787.
- [2] 杨春燕,蔡文.可拓工程[M].北京:科学出版社,2007.
- [3] 蔡文,杨春燕,林伟初.可拓工程方法[M].北京:科学出版社,2000.
- [4] 刘金海,冯涛,谢东海.煤层突出危险性预测的可拓方法[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2008,23(3):28-31.
- [5] 蔡文.可拓学概述[J].系统工程理论与实践,1998(1):76-84.
- [6] 刘玉祥.可拓学在矿山安全评价分析中的应用[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2009,28(6):898-901.
- [7] 程远平.煤矿瓦斯防治理论与工程应用[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010.
- [8] 刘洪.《煤矿安全规程》专家解读——井工部分[M].徐州:中国矿业大学出版社,2006.
- [9] 时宁国.煤矿监测监控技术[M].兰州:甘肃科学技术出版社,2010.
- [10] 王德明.矿井通风安全[M].徐州:中国矿业大学出版社,2009.