

基于模糊物元理论的深部开采 底板突水安全性评价

刘伟韬, 刘云娟, 申建军

(山东科技大学 矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:基于可拓学理论和专家打分-层次分析法,利用专家打分-层次分析法确定影响底板突水各因素的权系数,选取了影响底板突水等级的 12 个影响因素作为评价特征,运用可拓学理论建立物元模型进行底板突水安全性评价,并结合实际工程背景,对山东华泰矿业有限公司深部 315 采区进行了底板突水安全性评价。结果表明,该矿深部开采区域突水等级为 IV 级,涌水量偏高,约为 800~1 100 m³/h,验证了评价方法的有效性,评价结果客观合理,具有较好的实用性。

关键词:深部开采;底板突水;专家打分-层次分析法;模糊物元模型;安全性评价

中图分类号:TD745

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2014)03-0025-07

Safety Evaluation of Floor Water Inrush in Deep Mining Based on the Fuzzy Matter-element Theory

Liu Weitao, Liu Yunjuan, Shen Jianjun

(College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology,
Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Based on the theory of extenics and expert scoring -analytic hierarchy process (AHP), expert scoring -analytic hierarchy process (AHP) was used to determine the weights of the various factors effecting the inrush, with consideration of inrush grade 12 factors as evaluation characteristics. The matter-element model for floor water safety evaluation was built and a safety evaluation of water-inrush from floor in deep mining was carried out in the actual engineering background. The results in the field work indicate that the water levels are category IV, and the outflow ranges between 800-1 100 m³/h. The evaluation results verify the validity and applicability of the evaluation method.

Key words: deep mining; water-inrush from floor; expert scoring-analytic hierarchy process (AHP); fuzzy matter-element model; safety evaluation

随着我国对煤炭资源需求的增加,矿井开采深度以平均每年 20 m 的速度增加,预计在未来 20 年我国东部大部分煤矿将进入到 1 000~1 500 m 的深度。随开采深度及开采强度的不断加大,加之我国华北型煤田水文地质条件十分复杂,承压水威胁日益严重,采用突水系数法预测底板突水往往不再准确^[1]。因此,深部开采底板突水安全性评价研究,对于底板突水预测、采煤方法的选取等具有重大理论意义和实际应用价值。计算机技术的发展,使模糊数学、随机理论、专家系统、人工神经网络等软科学决策方法在底板突水预测和评价中得到了广泛应用。张敏江等^[2]开发了煤层底板突水预报专家系统;刘伟韬^[3]运用层次分析法,基于突水系数概念和“下三带”理论,考虑影响突水的多方面因素,融入预测预报领域知名专家的防治水经验和知识,

收稿日期:2013-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51274135,51034003);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2011SF016)

作者简介:刘伟韬(1970—),男,山东东明人,教授,博士,主要从事矿井特殊开采及矿井水害防治方面的教学与研究工作。

E-mail:wtliu@sdust.edu.cn

建立了底板突水预测专家系统;王延福等^[4]开发了突水预报人工神经网络系统;刘再斌等^[5]利用二项 Logistic 回归方法建立了煤层底板突水回归概率模型,结合神经网络研发了煤层底板突水预测数据挖掘分类系统;张文泉^[6]以“下三带”理论为框架,建立了底板突水的层次-模糊综合评判系统和基于高木-关野模糊准则的集成人工神经网络底板突水预测系统;施龙青等^[7-9]在突水概率指数以及运用 BP 神经网络、多属性决策及 D-S 证据理论预测突水方面做了大量的研究,取得了一定成果;高延法等^[10]采用突水系数法和突水优势面两条推理途径开发了底板突水危险性评价专家系统;李忠建等^[11]在多源信息复合的基础上,提出评价突水影响因素影响程度的新方法——无量纲信息融合法,并进行了南屯煤矿下组煤开采突水危险性分区评价。朱纪明^[12]采用专家打分和层次分析法确定了各因素在矿井底板突水过程中所起作用的权值,根据可拓学理论建立了矿井底板突水预测的模糊物元模型,并对矿井底板突水风险进行了预测。

本文运用可拓学模糊物元理论对深部开采底板突水安全性评价研究,并采用专家打分-层次分析法来确定各评价指标的权系数,利用可拓学理论分析评价突水的等级范围。

1 可拓学与模糊物元模型

可拓学是以事物、特征及事物关于该特征的量值三者所组成的三元组,假设给定事物的名称 N ,其关于特征 c 的量值为 v ,以有序三元组 $R = \{N, c, v\}$ 作为描述事物的基本元,简称物元^[13]。

根据文献[13],一个事物可以有多个特征,如果事物 N 以 n 个特征 c_1, c_2, \dots, c_n 及相应的量值 v_1, v_2, \dots, v_n 描述,则 n 维物元表示为:

$$R = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \dots & \dots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \dots \\ R_n \end{bmatrix} \quad \text{或者 } R = (N, C, V), C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_n \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_n \end{bmatrix}.$$

基于模糊物元模型进行评价具体步骤如下:

① 确定经典域和节域

$$\text{令 } R_{0t} = (N_{0t}, C, V_{0t}) = \begin{bmatrix} N_{0t} & c_1 & V_{0t1} \\ & c_2 & V_{0t2} \\ & \dots & \dots \\ & c_n & V_{0tn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{0t} & c_1 & [a_{0t1}, b_{0t1}] \\ & c_2 & [a_{0t2}, b_{0t2}] \\ & \dots & \dots \\ & c_n & [a_{0tn}, b_{0tn}] \end{bmatrix},$$

$$R_P = (N, C, V_P) = \begin{bmatrix} P & c_1 & V_{P1} \\ & c_2 & V_{P2} \\ & \dots & \dots \\ & c_n & V_{Pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & c_1 & [a_{P1}, b_{P1}] \\ & c_2 & [a_{P2}, b_{P2}] \\ & \dots & \dots \\ & c_n & [a_{Pn}, b_{Pn}] \end{bmatrix}.$$

其中: N_{0t} —所划分的 t 个等级; c_i —等级 N_{0t} 的特征, $i=1, 2, \dots, n$; 经典域 V_{0ti} 分别为 N_{0t} 关于特征 c_i 所规定的量值范围,即各等级对应的特征所取的数据范围; P —等级的全体; V_{Pi} — P 关于 c_i 所取的量值的范围。

② 确定待评物元: $R = \begin{bmatrix} P & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \dots & \dots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix};$

③ 确定权系数;

④ 确定各因素关联度: $K_t(v_{ti}) = \frac{\rho(v_i, V_{0ti})}{\rho(v_i, V_{Pi}) - \rho(v_i, V_{0ti})};$

⑤ 确定待评物元 P 关于等级 j 的关联度: $K_t(P) = \sum_{i=1}^n \alpha_i K_t(v_i);$

⑥等级评定。

2 底板突水安全性评价指标体系

影响煤层底板突水的主要因素有地质构造、矿山压力、水压力、隔水层、底板岩性组合、开采空间及开采方法等。通过对底板突水影响因素分析,把影响底板突水评价指标分为3个一级指标(A_1, A_2, A_3),12个二级指标(A_{1i}, A_{2j}, A_{3k}),构建层次分析结构模型(图1)。

3 底板突水主控因素及权值确定

专家打分-层次分析法具有简捷、灵活、实用的特点,把定性与定量分析结合在一起,对于评价因素多且彼此之间缺少定量关系的评判过程比较适用^[14]。对所建立的层次结构模型,根据上面所得的底板突水评价指标体系,咨询多位现场专家、高校和科研单位等专业人员的意见,对其进行打分。参照1~9标度方法(表1)及专家打分表,构造出判别矩阵,由此计算出各个因素的权值(表2)。

运用求和的方法计算矩阵的最大特征值及其相对应的特征向量:

①对判断矩阵A的每一列归一化,得

$$\bar{w}_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^n a_{ij}; \quad (1)$$

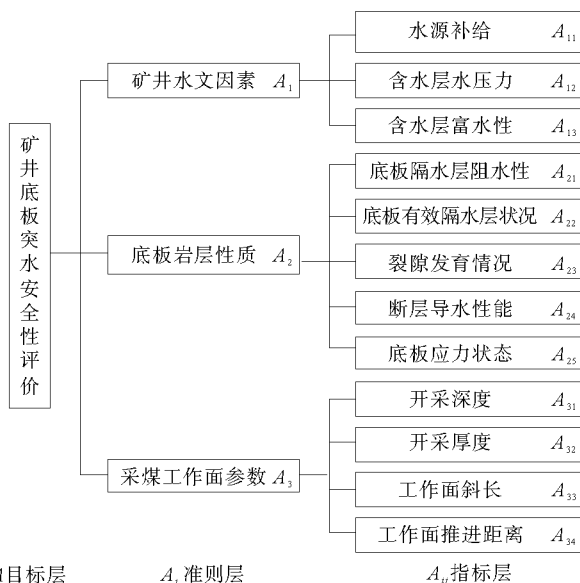


图1 层次结构模型

Fig. 1 Hierarchical model

表1 1~9级标度含义设定表

Tab. 1 The set table of scale meaning from 1 to 9

标度	含义
1	表示两个元素相比,重要性相等
3	表示两个元素相比,前者比后者稍微重要
5	表示两个元素相比,前者比后者明显重要
7	表示两个元素相比,前者比后者强烈重要
9	表示两个元素相比,前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断中间值

表2 各因素权重总排序

Tab. 2 The sequencing of factors weight

因素	$A_1(w=0.3333)$	$A_2(w=0.4444)$	$A_3(w=0.2222)$	权重	排序
A_{11}	0.2381	0	0	0.0794	6
A_{12}	0.4286	0	0	0.1429	1
A_{13}	0.3333	0	0	0.1111	3
A_{21}	0	0.2286	0	0.1049	4
A_{22}	0	0.1714	0	0.0762	7
A_{23}	0	0.2000	0	0.0889	5
A_{24}	0	0.2571	0	0.1143	2
A_{25}	0	0.1429	0	0.0635	9
A_{31}	0	0	0.3077	0.0684	8
A_{32}	0	0	0.2308	0.0513	11
A_{33}	0	0	0.2692	0.0598	10
A_{34}	0	0	0.1923	0.0427	12

②对 \bar{w}_{ij} 按行求和,得

$$w_i = \sum_{j=1}^n \bar{w}_{ij}; \quad (2)$$

③对 w_i 进行归一化处理,即

$$W_i = w_i / \sum_{i=1}^n w_i. \quad (3)$$

得向量 $W = [W_1 \quad W_2 \quad \dots \quad W_n]^T$,也就是比较矩阵的因素 1~n 的权重。

4 深部开采底板突水安全性评价

4.1 底板突水安全性评价物元模型的建立

根据矿井涌水量(Q)的大小,将煤矿底板突水危险性划分为 5 个等级,分别为 I 级($Q < 100 \text{ m}^3/\text{h}$), II 级($Q = 100 \sim 300 \text{ m}^3/\text{h}$), III 级($Q = 300 \sim 800 \text{ m}^3/\text{h}$), IV 级($Q = 800 \sim 1\,100 \text{ m}^3/\text{h}$), V 级($Q > 1\,100 \text{ m}^3/\text{h}$)^[12]。

4.2 确定经典域物元、节域物元、待评物元

底板突水是一种相对复杂的事件,其影响因素来自多个方面,就某一具体的影响因素来讲,也很难进行定量评价。关于矿井底板突水影响因素的分析,本研究根据选定的特征参数对底板涌水的影响程度进行定性与定量分析,对于定性描述的参数或是非线性变化参数,采用多相模糊统计方法来构造隶属函数,对于可定量描述的特征参数和呈线性变化的因素直接用其量值表示。根据文献[12],基于底板突水防治经验,对底板涌水等级用单因素法进行分级,确定底板涌水等级评价单因素指标(表 3),在确定哪些因素对底板突水有影响时采用层次分析法,在确定因素权值时采用专家打分法,该方法具有一定的可靠性和合理性。

表 3 底板涌水等级评价单因素指标表

Tab. 3 Single factor index of water inflow grades evaluation in mining floor

级别 \ 因素	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
c_1 水压/MPa	0~0.50	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.5	2.5~5.0
c_2 含水层富水性	0~0.15	0.15~0.35	0.35~0.6	0.60~0.85	0.85~1.00
c_3 水源补给情况	0~0.10	0.10~0.35	0.35~0.55	0.55~0.85	0.85~1
c_4 底板隔水层阻水性	0.80~1.00	0.60~0.80	0.40~0.60	0.20~0.40	0~0.20
c_5 $(h_1 + h_3)/H$	0.50~0.85	0.85~0.95	0.95~1.05	1.05~1.50	1.50~2.00
c_6 裂隙发育状况	0~0.15	0.15~0.35	0.35~0.60	0.60~0.85	0.85~1.00
c_7 断层导水性	0~0.15	0.15~0.35	0.35~0.55	0.55~0.85	0.85~1.00
c_8 底板应力状态	3.5~5.5	3.0~3.5	2.5~3.0	1.5~2.5	0.5~1.5
c_9 开采深度/m	50~100	100~350	350~600	600~900	900~1\,300
c_{10} 开采厚度/m	0.6~1.2	1.2~2.5	2.5~4.5	4.5~6.5	6.5~12.0
c_{11} 工作面长度隶属度	0~0.15	0.15~0.35	0.35~0.55	0.55~0.85	0.85~1.00
c_{12} 工作面推进距离隶属度	0~0.15	0.15~0.35	0.35~0.55	0.55~0.85	0.85~1.00

注: h_1 —采动破坏深度, m; h_3 —承压水原始导升高度, m; H —隔水层厚度, m。

确定各个突水等级的经典域和节域如下:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R}_{01} &= \begin{bmatrix} N_{01} & c_1 & (0, 0.5) \\ & c_2 & (0, 0.15) \\ & c_3 & (0, 0.1) \\ & c_4 & (0.80, 1) \\ & c_5 & (0.5, 0.85) \\ & c_6 & (0, 0.15) \\ & c_7 & (0, 0.15) \\ & c_8 & (3.5, 5.5) \\ & c_9 & (50, 100) \\ & c_{10} & (0.6, 1.2) \\ & c_{11} & (0, 0.15) \\ & c_{12} & (0, 0.15) \end{bmatrix} &
 \mathbf{R}_{02} &= \begin{bmatrix} N_{02} & c_1 & (0.5, 1) \\ & c_2 & (0.15, 0.35) \\ & c_3 & (0.1, 0.35) \\ & c_4 & (0.60, 0.80) \\ & c_5 & (0.85, 0.95) \\ & c_6 & (0.15, 0.35) \\ & c_7 & (0.15, 0.35) \\ & c_8 & (3.0, 3.5) \\ & c_9 & (100, 350) \\ & c_{10} & (1.2, 2.5) \\ & c_{11} & (0.15, 0.35) \\ & c_{12} & (0.15, 0.35) \end{bmatrix} &
 \mathbf{R}_{03} &= \begin{bmatrix} N_{03} & c_1 & (1, 1.5) \\ & c_2 & (0.35, 0.6) \\ & c_3 & (0.35, 0.55) \\ & c_4 & (0.40, 0.6) \\ & c_5 & (0.95, 1.05) \\ & c_6 & (0.35, 0.6) \\ & c_7 & (0.35, 0.55) \\ & c_8 & (2.5, 3.0) \\ & c_9 & (350, 600) \\ & c_{10} & (2.5, 4.5) \\ & c_{11} & (0.35, 0.55) \\ & c_{12} & (0.35, 0.55) \end{bmatrix} \\
 \mathbf{R}_{04} &= \begin{bmatrix} N_{04} & c_1 & (1.5, 2.5) \\ & c_2 & (0.6, 0.85) \\ & c_3 & (0.55, 0.85) \\ & c_4 & (0.20, 0.4) \\ & c_5 & (1.05, 1.5) \\ & c_6 & (0.6, 0.85) \\ & c_7 & (0.55, 0.85) \\ & c_8 & (1.5, 2.5) \\ & c_9 & (600, 900) \\ & c_{10} & (4.5, 6.5) \\ & c_{11} & (0.55, 0.85) \\ & c_{12} & (0.55, 0.85) \end{bmatrix} &
 \mathbf{R}_{05} &= \begin{bmatrix} N_{05} & c_1 & (2.5, 5) \\ & c_2 & (0.85, 1) \\ & c_3 & (0.85, 1) \\ & c_4 & (0, 0.2) \\ & c_5 & (1.5, 2) \\ & c_6 & (0.85, 1) \\ & c_7 & (0.85, 1) \\ & c_8 & (0.5, 1.5) \\ & c_9 & (900, 1300) \\ & c_{10} & (6.5, 12) \\ & c_{11} & (0.85, 1) \\ & c_{12} & (0.85, 1) \end{bmatrix} &
 \mathbf{R}_P &= \begin{bmatrix} P & c_1 & (0, 5) \\ & c_2 & (0, 1) \\ & c_3 & (0, 1) \\ & c_4 & (0, 1) \\ & c_5 & (0.5, 2) \\ & c_6 & (0, 1) \\ & c_7 & (0, 1) \\ & c_8 & (0.5, 5.5) \\ & c_9 & (50, 1300) \\ & c_{10} & (0.6, 12) \\ & c_{11} & (0, 1) \\ & c_{12} & (0, 1) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

4.3 计算评价指标对于各突水等级关联度、综合关联度与结果评定

待评物元的第 i 个因素关于煤层底板涌水等级 t 的关联度通过式(4)求得:

$$\mu_{ti}(v_i) = \frac{\rho(v_i, V_{0ti})}{\rho(v_i, V_{pi}) - \rho(v_i, V_{0ti})}; \tag{4}$$

其中: $\rho(x_0, x) = \begin{cases} a - x_0 & x_0 \leq \frac{a+b}{2} \\ x_0 - b & x_0 \geq \frac{a+b}{2} \end{cases}$, x_0 为数值, (a, b) 为 x 取值区间。

形成关联系数复合物元矩阵:

$$\mathbf{R}_{12 \times 5} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} & \mu_{14} & \mu_{15} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} & \mu_{24} & \mu_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_{121} & \mu_{122} & \mu_{123} & \mu_{124} & \mu_{125} \end{bmatrix}. \tag{5}$$

对每个因素 c_i 取权系数 W_i , 则待评物元 P 关于评价等级 t 的综合关联度为:

$$K_{ti}(P) = \sum W_i \mu_t(v_i); \tag{6}$$

由 5 个综合关联度所组合成的综合关联度向量为:

$$\mathbf{K}_{1 \times 5} = (K_{t1}, K_{t2}, K_{t3}, K_{t4}, K_{t5}). \tag{7}$$

当 $K_{t_0}(P) = \max\{K_t(P) \mid t=1,2,3,4,5\}$, 则此物元属于等级 t_0 。

5 工程应用

山东华泰矿业有限公司扩大三采深部 315 采区回采工作面位于太原组中下部,开采 15 煤层,开采厚度为 1.86 m,平均采深 700 m,倾角在 15°左右,采用走向长壁法开采。煤层上距一灰约 63 m,上距二灰约 19.80 m,底板隔水层厚度为 136 m,底板采动破坏深度 23.3 m。315 采区构造非常复杂,整个采区位于 $F_{付1}$ 和 $F_{秦1}$ 两条大断层之间,并且发育多条派生断层。各断块内地层走向局部有一定变化而形成次生不对称平缓短轴褶曲,褶曲幅度均较小。断裂构造较为发育,断层导水性较好。

矿区范围内太原组薄层灰岩、本溪组五、六灰及奥灰的富水性在浅部岩溶裂隙发育,富水性较强,随着埋藏深度加大而逐渐减弱,在垂向上具有分带性。隔水层为古近纪红色粘土质粉砂岩,侏罗纪红色砂岩以及煤系地层中各层粉砂岩、泥质岩、粘土岩,这些岩层层位稳定,均具有较好的隔水性能,阻水能力为中等偏上。315 采区下部奥灰水文观测孔口标高 -700 m,实测水压 3.14 MPa;垂直应力为上覆岩层重量,约 20 MPa,实测最大水平应力方向 123.33°~127.15°,最大水平主应力为垂直应力的 1.57~1.80 倍。

根据工作面开采地质条件,建立待评物元为:

$$R = \begin{matrix} P \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \\ c_7 \\ c_8 \\ c_9 \\ c_{10} \\ c_{11} \\ c_{12} \end{matrix} \begin{matrix} 3.14 \\ 0.70 \\ 0.75 \\ 0.82 \\ 1.25 \\ 0.70 \\ 0.70 \\ 1.57 \\ 700 \\ 1.86 \\ 0.20 \\ 0.80 \end{matrix} ;$$

根据关联度计算公式计算各因素关于各等级的关联系数,得到关联系数复合物元矩阵:

$$R_{12 \times 5} = \begin{matrix} 0.5867 & -0.5350 & -0.4686 & -0.2560 & 0.5246 \\ -0.6471 & -0.5385 & -0.2500 & 0.5000 & -0.3333 \\ -0.7222 & -0.6154 & -0.4444 & 0.6667 & -0.2857 \\ 0.1250 & -0.1000 & -0.5500 & -0.7000 & -0.7750 \\ -0.3478 & -0.2857 & -0.2105 & 0.3636 & -0.2500 \\ -0.6471 & -0.5385 & -0.2500 & 0.5000 & -0.3333 \\ -0.6471 & -0.5385 & -0.3333 & 1.0000 & -0.3333 \\ -0.6433 & -0.5720 & -0.4650 & 0.0700 & -0.0614 \\ -0.5000 & -0.3684 & -0.1429 & 0.2000 & -0.2500 \\ -0.3438 & 1.0323 & -0.3368 & -0.6769 & -0.7864 \\ -0.2000 & 0.3333 & -0.4286 & -0.6364 & -0.7647 \\ -0.7647 & -0.6923 & -0.5556 & 0.3333 & -0.2000 \end{matrix} .$$

根据表 3 的计算结果,各因素的权值为:

$$W = (0.0794, 0.1429, 0.1111, 0.1049, 0.0762, 0.0889, 0.1143, 0.0635, 0.0684, 0.0513, 0.0598, 0.0427)^T .$$

把关联系数矩阵和各因素权值代入综合关联度计算公式中得综合关联度向量:

$$K_{1 \times 5} = (-0.5015, -0.3477, -0.3623, 0.1978, -0.3214) .$$

通过计算该工作面突水等级为 IV 级,涌水量偏高,涌水量约在 $800\sim 1\ 100\ \text{m}^3/\text{h}$ 之间。该评价结果说明工作面开采安全性处于临界状态,这就需要选择合适的开采方法,采取相应的防治水措施来保证开采工作的安全性。

6 结束语

1)通过对煤层底板突水主要影响因素的分析,用专家打分-层次分析法确定底板突水过程中各影响因素的权值,依据可拓学理论建立深部开采煤层底板突水安全性评价的模糊物元模型,对矿井进行底板突水安全性评价。

2)利用模糊物元模型预测华泰矿业有限公司深部采区工作面突水等级为 IV 级,涌水量偏高,约为 $800\sim 1\ 100\ \text{m}^3/\text{h}$ 。该评价结果表明工作面安全性处于临界状态,需要选择合适的开采方法、变革采煤工艺并采取相应的防治水措施来保证开采工作的安全。

参考文献:

- [1]施龙青. 突水系数由来及实用性分析[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2012,31(6):6-9.
Shi Longqing. Analysis of the origin of water inrush coefficient and its applicability[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2012, 31(6): 6-9.
- [2]张敏江,王延福. 华北聚煤区煤矿工作面回采过程中突水预报专家系统[J]. 水文地质工程地质,1992,19(2):25-29.
Zhang Minjiang, Wang Yanfu. Expert system (E. S.) for the water inrushing forecast of coal mining in North China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1992, 19(2): 25-29.
- [3]刘伟韬. 底板突水预测专家系统研究[D]. 泰安:山东矿业学院,1994:46-52.
- [4]王延福,靳德武,曾艳京. 矿井煤层底板突水预测新方法研究[J]. 水文地质工程地质,1999(4):33-37.
Wang Yanfu, Jin Dewu, Zeng Yanjing. Study on the new method of predicting water inrush from coal floor [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1999(4): 33-37.
- [5]刘再斌,靳德武,刘其声. 基于二项 Logistic 回归模型与 CART 树的煤层底板突水预测[J]. 煤田地质与勘探,2009,37(1):56-61.
Liu Zaibin, Jin Dewu, Liu Qisheng. Prediction of water inrush through coal floor based on binary logistic regression model and CART [J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(1): 56-61.
- [6]张文泉. 矿井(底板)突水灾害的动态机理及综合判测和预报软件开发研究[D]. 青岛:山东科技大学,2004:1-20.
- [7]施龙青,韩进,宋扬,等. 用突水概率指数法预测采场底板突水[J]. 中国矿业大学学报,1999,28(5):442-444.
Shi Longqing, Han Jin, Song Yang, et al. Forecast of water inrush from mining floor with probability indexes [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(5): 442-444.
- [8]于小鸽,韩进,施龙青. 基于 BP 神经网络的底板破坏深度预测[J]. 煤炭学报,2009,34(6):731-736.
Yu Xiaoge, Han Jin, Shi Longqing. Forecast of destroyed floor depth based on BP Neural Networks [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(6): 731-736.
- [9]韩进,施龙青,翟培合,等. 多属性决策及 D-S 证据理论在底板突水决策中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(2):3727-3732.
Han Jin, Shi Longqing, Zhai Peihe, et al. Application of multi-attribute decision and D-evidence theory to water-inrush decision of floor in mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 3727-3732.
- [10]高延法,章延平,张慧敏,等. 底板突水危险性评价专家系统及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(2):253-258.
Gao Yanfa, Zhang Yanping, Zhang Huimin, et al. Research on expert system for risk assessment of water inrush from coal floor and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 253-258.
- [11]李忠建,魏久传,尹会永. 底板突水影响因素评价新方法:无量纲信息融合法[J]. 中国矿业,2010,19(1):95-113.
Li Zhongjian, Wei Jiuchuan, Yin Huiyong. Dimensionless information fusion: A new method to evaluation of factors [J]. China Mining Magazine, 2010, 19(1): 95-113.
- [12]朱纪明. 采场底板岩层断层分析及底板突水预测研究[D]. 青岛:山东科技大学,2012:69-100.
- [13]蔡文,杨春燕,林伟初. 可拓工程方法[M]. 北京:科学出版社,2000:9-36.
- [14]刘伟韬,宋传文,张国玉. 底板突水的专家评分-层次分析预测与评价[J]. 工程勘察,2002(1):22-25.
Liu Weitao, Song Chuanwen, Zhang Guoyu. Prediction and evaluation of floor water-irruption based on expert scoring-hierarchical analysis [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2002(1): 22-25.