

文章编号: 1673-3363-(2014)05-0739-06

# 基于未确知聚类法的底板采动破坏深度动态预测

程爱平<sup>1</sup>, 高永涛<sup>1</sup>, 梁兴旺<sup>2</sup>, 季毛伟<sup>1</sup>, 王存文<sup>1</sup>, 高艳华<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中煤平朔集团有限公司井工一矿, 山西 朔州 036006)

**摘要** 根据微震监测结果, 利用未确知聚类优化法, 选取采深、煤层倾角、采厚、构造影响程度4个主要影响因素作为判别指标, 建立煤矿底板采动破坏深度动态预测模型。利用微震实测的18组数据作为训练样本, 以样本均值为聚类中心, 采用信息熵理论确定各判别指标的权重, 通过计算样本的多指标综合测度与所属类别样本均值乘积之和获得底板采动破坏深度的预测值, 并对样本数据进行逐一检验。为进一步验证该方法的可靠性, 另选5组样本进行预测, 将预测值与微震实测结果做了比较。研究表明: 底板采动破坏深度的预测值与实测值的平均相对误差不超过1%, 底板采动破坏深度动态预测模型是可靠实用的, 可以在同类矿山进行推广应用。

**关键词** 微震监测; 未确知聚类; 底板采动破坏深度; 预测

中图分类号 TD 745

文献标志码 A

## Dynamic forecasting of mining-induced failure depth of floor based on unascertained clustering method

CHENG Aiping<sup>1</sup>, GAO Yongtao<sup>1</sup>, LIANG Xingwang<sup>2</sup>,  
JI Maowei<sup>1</sup>, WANG Cunwen<sup>1</sup>, GAO Yanhua<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;  
2. The First Underground Mine, China National Coal Pingshuo Coal Mining Co Ltd, Shuozhou, Shanxi 036006, China)

**Abstract** According to the microseismic monitoring results, four main influencing factors, that is, mining depth, coal seam dip angle, mining thick and structure impact level, were regarded as judgment indexes and used to establish the dynamic forecasting model of mining-induced failure depth of floor by unascertained clustering method. The mean value of training samples, which come from 18 datasets measured by microseismic monitoring, were set as cluster center, and the weight indexes of judgment were determined by information entropy theory. Through calculating the product sum of multi-index comprehensive measurement of sample and the corresponding sample average, the forecasting value of the mining-induced failure depth of floor was obtained, and then the model was identified by the whole samples. In addition, to further test its reliability, the method was applied to forecast the other five samples to compare the forecasted values with the measured values. The results show that the average of relative error between forecasted values and measured values is less than 1%. The dynamic forecasting model of mining-induced failure depth of floor is reliable and practical, and it can be popularized and applied to the similar mines.

收稿日期: 2013-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174016)

作者简介: 程爱平(1986—), 男, 湖北省仙桃市人, 博士, 从事微震监测工程与矿山动力灾害方面的研究。

E-mail: zhouhexuan@163.com

Tel: 18810348750

**Key words** microseismic monitoring; unascertained clustering; mining-induced failure depth of floor; forecast

煤矿开采过程中, 由于采动引起矿山压力的变化, 造成煤层底板的破坏, 导致底板含水层突水, 发生淹井事故, 尤其在带压开采的条件下, 危害巨大; 因此, 开展煤层底板采动破坏深度的相关研究, 可对预防煤层底板突水事故产生积极的影响。目前, 确定底板采动破坏深度的方法主要有理论预测法<sup>[1-2]</sup>、现场实测法<sup>[3-4]</sup>和数值计算法<sup>[5-6]</sup>3 种。相比于其他 2 种方法, 理论预测法由于其经济性、可操作性和可靠性等优势而被广泛采用和接受。

然而, 煤层底板岩层具有十分复杂的力学物理特性, 底板采动破坏带深度会随着工程地质环境的改变而改变。随着回采工作面推进, 简化的力学、数学或者经验公式很难准确描述采动破坏深度在工作面推进不同阶段、不同区域的动态发展分布规律。为了更可靠、准确地预测底板采动破坏深度动态变化, 必须将这些不确定因素充分考虑在内并进行分析。未确知数学理论在这方面具有无可比拟的优势。刘开第等<sup>[7]</sup>建立了未确知理论并给出未确知测度模型后将其用于城市环境质量评价, 取得较好结果。在此基础上, 万玉成<sup>[8]</sup>等提出和发展了未确知聚类方法, 并被先后用于矿井通风安全评价<sup>[9]</sup>、膨胀土胀缩等级分类<sup>[10]</sup>、开采沉陷预测<sup>[11]</sup>、尾矿库风险评价<sup>[12]</sup>等领域, 取得了令人满意的效果。基于此, 本文对未确知聚类方法进行优化, 并将其用于煤矿底板采动破坏深度预测研究中, 根据山西平朔井工一矿微震监测<sup>[13]</sup>结果, 建立底板采动破坏深度动态预测模型, 为底板突水预测预报提供指导性意见。

## 1 底板采动破坏深度影响因素分析

影响底板采动破坏深度的因素有很多, 根据实测资料及理论研究因素<sup>[14-17]</sup>, 主要因素有 6 种:

1) 采深  $H$ 。随着采深增大, 上覆岩层自重加大, 底板岩层原岩应力也变大, 底板采动破坏深度越大。底板采动破坏深度与开采深度呈正相关关系。

2) 采厚  $h$ 。在一定采深和既定煤层条件下, 采厚越大, 煤层底板承受压应力则越大, 底板采动破坏深度越深。

3) 煤层倾角  $\theta$ 。煤层倾角越大, 工作面上山一侧的煤柱对底板的切向应力增大, 煤层底板的采动

破坏深度越大。

4) 工作面斜长  $L$ 。在一定的开采条件下, 工作面斜长越长, 采空区范围越大, 形成的矿山压力就越不稳定, 矿山压力对煤层底板的破坏越充分, 煤层底板的破坏深度越大。

5) 煤层底板抗破坏能力  $D$ 。煤层底板的抗破坏能力是岩层组合、煤层底板岩石强度及原始裂隙发育状况的综合反映, 抗破坏能力越强, 底板采动破坏深度越小。

6) 构造影响程度  $F$ 。工作面内是否有断层、褶曲等构造对底板破坏深度影响较大。煤层底板岩层被断层或断裂裂隙切割后, 其整体强度会大大降低, 底板破坏的程度和深度均会增加。

## 2 未确知聚类预测优化法

未确知聚类预测优化方法是以未确知测度聚类理论为基础, 利用样本实测数据中各判别指标的均值作为分类中心, 建立各判别指标的单指标测度函数, 采用信息熵理论确定各判别指标的权重, 计算待测对象的多指标综合测度, 根据未确知测度距离确定待测对象所属类别, 最后通过计算待测对象的多指标综合测度与所属类别对象均值乘积之和获得待测对象的预测值。具体方法如下:

1) 构建研究对象的判别指标体系。分析研究对象的影响因素, 建立研究对象样本判别指标集。令研究对象空间为  $X$ , 若  $X$  中的任一样本  $X_i (i=1, 2, \dots, n)$  与  $m$  个影响因素  $W_1, W_2, \dots, W_m$  有关, 记集合  $W=\{W_1, W_2, \dots, W_m\}$  为指标集。

2) 对样本进行分类。将样本集  $X=\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  按研究对象特性分为  $K$  类, 组成分类集  $C=\{C_1, C_2, \dots, C_K\}$ 。

3) 确定单指标测度。令  $r_{ijk}=r(r_{ij} \in C_k)$  为样本  $X_i$  的第  $j$  个指标  $W_j$  的测量值  $x_{ij}$  属于第  $k$  个分类  $C_k$  的程度,  $r_{ijk}$  即为单指标测度, 同时满足下列条件:

$$0 \leq r(x_{ij} \in C_k) \leq 1 \quad (1)$$

$$r(x_{ij} \in C) = 1 \quad (2)$$

$$r\left|x_{ij} \in \bigcup_{i=1}^k C_i\right| = \sum_{i=1}^k r(x_{ij} \in C_i) \quad (3)$$

4) 确定判别指标权重。由于各判别指标对研究对象的影响程度不一样, 因此, 以权重系数  $u_j$  表示

样本  $X_i$  中  $W_j$  影响因素的影响程度。确定指标权重的方法有很多, 本文以信息熵理论计算指标权重。

$$v_j = 1 + \frac{1}{\lg K} \sum_{k=1}^K r_{ijk} \lg r_{ijk} \quad (4)$$

$$u_j = \frac{v_j}{\sum_{j=1}^m v_j} \quad (5)$$

式中:  $v_j$  为第  $j$  个影响因素所提供的信息量;  $K$  为分类数目;  $r_{ijk}$  为单指标测度;  $m$  为判别指标数目。

5) 计算多指标综合测度。令  $r_{ik}=r(r_i \in C_k)$  为样本  $X_i$  属于第  $k$  个分类  $C_k$  的概率,  $r_{ik}$  即为多指标综合测度, 计算公式如下:

$$r_{ik} = \sum_{j=1}^m u_j r_{ijk} \quad (6)$$

6) 确定待测对象所属类别。以最小未确知测度距离原理确定待测对象所属类别。令未确知测度距离  $d_k$  为多指标综合测度  $r_i$  和  $r_k$  的距离:

$$d_k = \sqrt{(r_{i1}-0)^2 + (r_{i2}-0)^2 + \dots + (r_{ik}-1)^2 + \dots + (r_{iK}-0)^2} \quad (7)$$

7) 计算待测对象预测值。待测对象的预测值为多指标综合测度与对应分类的样本平均值的乘积之和。令  $\bar{x}_k$  为各分类的样本平均值, 待测对象的预测值  $f$  计算公式如下:

$$f = \sum_{k=1}^K r_{ik} \bar{x}_k \quad (8)$$

### 3 底板采动破坏深度未确知测度预测模型

#### 3.1 工程背景

平朔井工一矿位于宁武煤田北端, 主采煤层为4层煤和9层煤。目前4号煤层基本采空, 开始进入9号煤层开采, 9号煤层最大厚度14.60 m, 最小厚度10.20 m, 平均厚度为11.90 m。采煤方法为放顶煤综采, 综采工作面走向长约3 000 m, 宽度约300 m, 机采高度3.2 m, 放煤高度9.84 m, 放煤步距0.8 m。19106工作面是9号煤层的首采工作面, 受底板奥灰承压含水层的影响, 工作面回采期间, 可能出现复杂的突水动态, 一旦发生底板突水, 将造成灾难性的后果, 极易淹井。因此, 特在19106工作面回采期间利用微地震监测系统开展底板采动破坏现场监测, 对底板采动破坏深度进行实时动态监测, 为安全回采提供保障。

#### 3.2 微震监测现场实施

微震监测是一种新的非破坏性地球物理方法, 通过在岩体中埋设微震传感器, 可以监测到岩体在外界采动时其内部的失稳破裂信号, 通过微震信号

的处理就可以确定破裂发生的位置<sup>[18]</sup>。通过现场校验炮试验进行波速校正, 利用“内场定位”和“外场定位”相结合技术可以使微震事件的定位精度满足各种目的微震监测工程需要<sup>[19]</sup>。

为了实现采动条件下底板突水危险性的实时监测预警, 选用了北京科技大学微地震监测研究中心生产的KJ551型微震监测系统。该系统于2012年12月28日开始正常运行和采集数据。在数据处理方面, KJ551微震监测系统后处理程序可通过波形特征识别有效的岩体破裂事件, 滤除生产爆破及机械震动等事件的干扰, 同时能实现地震学参数的定量计算。通过系统标定, 发现垂直方向的定位误差可以达到0.2 m<sup>[20]</sup>, 为底板采动破坏深度动态预测研究提供了条件。本次底板采动破坏深度动态预测模型样本数据全部来源于该微震监测结果。

#### 3.3 影响因素选取与样本参数获取

由于本次数据来源于同一个回采工作面, 即可认为各数据样本中工作面斜长完全一致, 故不考虑斜长的影响。底板抗破坏能力是岩层组合、煤层底板岩石强度及原始裂隙发育状况的综合反映。通过分析工作面钻孔资料, 发现19106工作面底板岩层组合、岩性基本一致, 所不同的主要是原始裂隙发育情况, 即底板抗破坏能力大小主要反映的是原始裂隙发育情况。而构造影响程度也反映了原始裂隙的发育情况, 因此, 为避免重复和简化研究, 本次分析中, 没有考虑底板抗破坏能力这一影响因素。

分析主要选取采深  $H$ 、煤层倾角  $\theta$ 、采厚  $h$ 、构造影响程度  $F$  作为判别指标对底板采动破坏深度  $L$  进行预测。

其中, 采深、煤层倾角、采厚取值均通过分析工程地质剖面图与现场工作面回采地质说明书获取, 构造影响程度取值根据现场物探资料确定, 底板采动破坏深度根据微震监测结果获取。

如1代表构造不发育: 大、中型断层很少; 地层产状单一, 很少有波状起伏。2代表构造发育: 大、中型断层较多或断层虽不多, 但互相切割交叉; 地层产状变化不大、有少量宽缓褶皱。3代表构造很发育: 大、中型断层相当发育, 或断层互相切割比较严重; 地层产状变化较大, 褶皱比较发育, 或有一定数量的紧密褶皱。

经统计分析, 最终选取具有典型代表意义的18组实测参数作为样本建立底板采动破坏深度未确知测度预测模型。具体样本参数见表1。

表 1 底板采动破坏深度样本集

Table 1 Sample set of floor mining-induced failure depth

序号	H/m	h/m	$\theta/(^{\circ})$	F	L/m
1	310	11.4	9	2	36.4
2	305	10.5	4	1	32.2
3	304	12.9	10	3	39.7
4	312	13.2	8	3	41.1
5	294	10.3	2	1	31.4
6	301	12.3	7	2	34.5
7	297	11.7	5	1	32.0
8	312	13.8	11	3	41.3
9	308	11.4	8	2	35.9
10	302	11.5	3	1	31.8
11	309	11.8	5	2	35.2
12	313	12.8	12	3	41.7
13	315	12.7	6	2	37.8
14	303	10.9	8	1	32.7
15	314	12.4	13	3	41.8
16	310	12.1	9	2	37.1
17	314	12.6	8	3	40.6
18	308	10.8	7	1	33.3

### 3.4 样本分类与未确知测度函数构建

根据微震监测底板采动破坏深度分布,将样本集分为 3 类,各分类包含的样本、相应的均值以及聚类中心见表 2。

表 2 样本分类

Table 2 Classification of samples

	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
均值	2, 5, 7, 10, 14, 18	1, 6, 9, 11, 13, 16	3, 4, 8, 12, 15, 17
H/m	301.5	308.83	311.5
h/m	10.95	11.95	12.95
$\theta/(^{\circ})$	4.83	7.33	10.33
F	1	2	3
L/m	32.23	38.59	41.03

用未确知集合描述“不确定性”现象时,关键在于构造合理的未确知测度函数。直线型未确知测度函数是应用最广、最简单的测度函数,在各个领域方面均得到了广泛应用,故本文采用直线型未确知测度函数。

由于判别指标较多,相应的公式较多,为简化分析,仅以采深为例,根据直线型未确知测度函数构造方法,构建未确知测度函数计算公式如下:

$$r_{il,C_1} = \begin{cases} 1, x < 301.5 \\ \frac{308.83 - x}{7.33}, 301.5 \leq x \leq 308.83 \\ 0, x > 308.83 \end{cases} \quad (9)$$

$$r_{il,C_2} = \begin{cases} 0, x < 301.5 \\ \frac{x - 301.5}{7.33}, 301.5 \leq x \leq 308.83 \\ \frac{311.5 - x}{2.67}, 308.83 \leq x \leq 311.5 \\ 0, x > 311.5 \end{cases} \quad (10)$$

$$r_{il,C_3} = \begin{cases} 0, x < 308.83 \\ \frac{x - 308.83}{2.67}, 308.83 \leq x \leq 311.5 \\ 1, x > 311.5 \end{cases} \quad (11)$$

根据上述未确知测度函数构建方法,确定底板采动破坏深度 4 个判别指标的未确知测度曲线如图 1 所示。

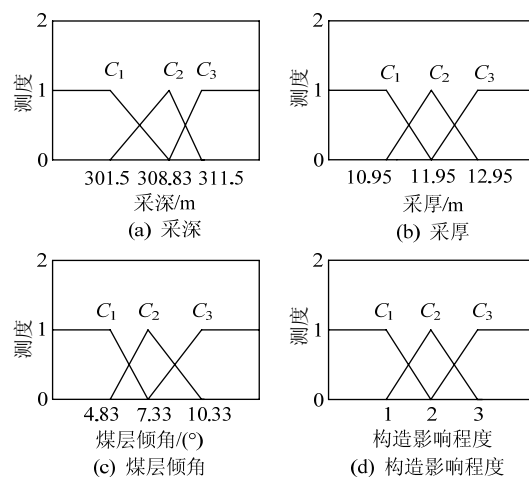


图 1 单指标测度曲线

Fig.1 Single index measurement curves

### 3.5 模型检验

以样本 1(见表 1)为例对底板采动破坏深度进行预测验证。根据图 1 的未确知测度函数曲线可依次计算出该样本的采深、采厚、煤层倾角和构造影响程度相对于分类系统的未确知测度,然后即可求得样本的单指标测度和指标权重。表 3 所示为样本 1 的单指标测度与相应的指标权重。由公式(6)计算出判别指标的多指标综合测度向量为(0.0967, 0.7278, 0.1755),进而利用公式(8)求得样本 1 的底板采动破坏深度预测值为 36.63 m,与实测值相比其相对误差为 0.6%。同理,可得出其余 17 个样本的预测值。图 2 为各样本底板采动破坏深度的预测值与实测值的对比直方图。经分析可知:除样本 5, 7, 10 预测相对误差略大外,其余 15 个样本的底板采动破坏深度预测值和实测值都很接近,平均相对误差仅为 0.85%。

表 3 样本 1 的单指标测度与权重  
Table 3 Single index measurement and weight of sample 1

参数	采深	采厚	煤层倾角	构造影响程度
$C_1$	0	0.55	0	0
$C_2$	0.562 5	0.45	0.444 4	1
$C_3$	0.437 5	0	0.555 6	0
权重	0.177 0	0.176	0.176 0	0.471

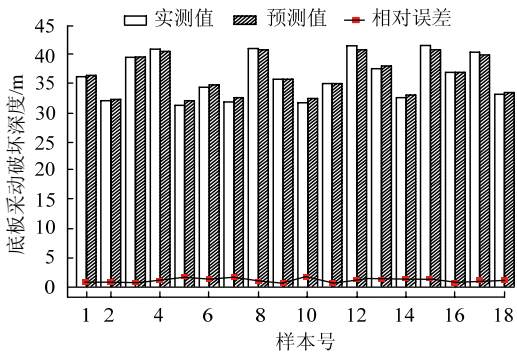


图 2 预测值与实测值的对比

Fig.2 Comparison of forecasted values and measured values

3.6 实例应用

为进一步验证本方法的可靠度，结合 19106 工作面地质资料与现场实际，另选 5 组样本(见表 4)进行预测，将本次预测结果与微震实测结果进行对比，对比结果见图 3。

表 4 工程实例样本集  
Table 4 Sample set of project example

序号	$H/m$	$h/m$	倾角 $\theta(^{\circ})$	程度( $F$ )	实测 $L/m$	预测 $L/m$
1	307	10.8	3	1	32.4	32.64
2	302	11.0	9	2	34.3	34.51
3	310	11.2	7	2	35.6	35.76
4	309	11.9	8	2	36.5	36.35
5	303	12.5	10	3	38.7	38.91

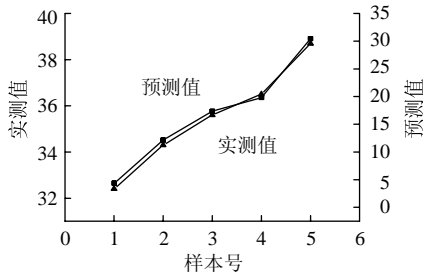


图 3 预测应用结果

Fig.3 Results of forecasted application

由图 3 可以看出，本方法预测值与实测值较为接近，由此证明基于未确知聚类方法构建的底板采动破坏深度未确知测度预测模型的预测精度较高，贴近现场实际，可满足工程实际应用需要。

4 结 论

煤矿回采底板采动破坏深度受多种因素的影响，各影响因素具有量纲不一、定量和非定量的特点，影响程度也具有不确定性和隐蔽性。综合考虑各影响因素的重要程度，利用未确知聚类方法，建立了底板采动破坏深度的未确知测度预测模型。

采用信息熵理论确定各判别指标的权重，可以减少人为的主观因素对判别结果的影响，有效反映不同指标对预测对象的影响程度，使评价更加全面、客观合理，提高模型预测精度。

以采深  $H$ 、煤层倾角  $\theta$ 、采厚  $h$ 、构造影响程度  $F$  作为判别指标构建的底板采动破坏深度预测模型，能较好地反映工作面回采过程中底板采动破坏深度的动态变化过程，为煤矿底板突水实时预测预报提供了一种新的方法。该预测模型不仅可用于井工一矿 9 煤其他回采工作面的突水预测，也对其他类似矿山具有借鉴作用。

参考文献：

[1] 宋振骥, 蒋宇静, 杨增夫, 等. 煤矿重大事故预测和控制的动力信息基础研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003: 1-50.

[2] 蔡东红, 董昌伟, 彭龙超, 等. 煤层覆岩圆拱结构下底板破坏深度的解析估算[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2005, 24(2): 13-16.

CAI Donghong, DONG Changwei, PENG Longchao, et al. The analytic estimation of floor failure depth under the arch structure of overlying strata of coal seam[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2005, 24(2): 13-16.

[3] 刘传武, 张明, 赵武升. 用声波测试技术确定煤层开采后底板破坏深度[J]. 煤炭科技, 2003(4): 4-5.

LIU Chuanwu, ZHANG Ming, ZHAO Wusheng. Use sound waves testing technology to ensure failure depth of mining coal seam floor[J]. Coal Science and Technology Magazine, 2003(4): 4-5.

[4] 刘树才, 刘鑫明, 姜志海, 等. 煤层底板导水裂隙演化规律的电法探测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 348.

LIU Shucai, LIU Xingming, JIANG Zhihai, et al. Research on electrical prediction for evaluation water conducting fracture zones in coal seam floor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 348.

[5] JAISWAL A, SHRIVASTVA B K. Numerical simulation of coal pillar strength[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46: 779-788.

[6] ISLAM R M, HAYASHI D, KAMRUZZAMAN A. Finite

- element modelling of stress distributions and problems for multi-slice long-wall mining in bangladesh, with special reference to the barapukuria coal mine[J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 78: 91-109.
- [7] 刘开第, 吴和琴, 庞彦军, 等. 不确定信息数学处理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 20-89.
- [8] 万玉成. 基于未确知性的预测与决策方法及其应用[D]. 南京: 东南大学, 2004: 16-27.
- [9] 李树刚, 马超, 王国旗. 基于未确知测度理论的矿井通风安全评价[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(2): 101-103.
- LI Shugang, MA Chao, WANG Guoqi. Colliery ventilation safety evaluation on the basis of uncertainty measurement[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(2): 101-103.
- [10] 董隴军, 李夕兵, 宫凤强. 膨胀土胀缩等级分类的未确知均值聚类方法及应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(5): 1075-1080.
- DONG Longjun, LI Xibing, GONG Fengqiang. Unascertained average clustering method for classification of grade of shrink and expansion for expansive soils and its application[J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2008, 39(5): 1075-1080.
- [11] 宫凤强, 李夕兵, 董隴军, 等. 基于未确知测度理论的采空区危险性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 323-330.
- GONG Fengqiang, LI Xibing, DONG Longjun, et al. Underground goaf risk evaluation based on uncertainty measurement theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 323-330.
- [12] 彭康, 李夕兵, 王世鸣, 等. 基于未确知测度模型的尾矿库溃坝风险评价[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(4): 1447-1452.
- PENG Kang, LI Xibing, WANG Shiming, et al. Optimization model of unascertained measurement for dam-break risk evaluation in tailings dams[J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2012, 43(4): 1447-1452.
- [13] 邓志刚, 李国宏, 盛继权, 等. 基于微震分析法的特厚煤层导水裂缝带高度研究[J]. 煤矿开采, 2012, 17(6): 86-88.
- DENG Zhigang, LI Guohong, SHENG Jiquan, et al. Research on height of water-induced fissure zone in mining extremely-thick coal-seam by micro-seismic method[J]. Coal Mining Technology, 2012, 17(6): 86-88.
- [14] 朱术云, 鞠远江, 赵振中, 等. 超化煤矿“三软”煤层采动底板变形破坏的实测研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 639-640.
- ZHU Shuyun, JU Yuanjiang, ZHAO Zhenzhong, et al. Field measurement study on deformation and destruction of “three-soft” coal seam floor of Chaohua coal mine [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 639-640.
- [15] 李佩全, 白汉营, 马杰, 等. 厚松散层薄基岩综采面覆岩破坏高度发育规律[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(1): 35-36.
- LI Peiquan, BAI Hanying, MA Jie, et al. Failure height development law of overburden thick loose strata above fully mechanized coal mining face under thin base rock[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(1): 35-36.
- [16] 张蕊, 姜振泉, 李秀晗, 等. 大采深厚煤层底板采动破坏深度[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 67-68.
- ZHANG Rui, JIANG Zhenquan, LI Xiuhan, et al. Study on the failure depth of think seam floor in deep mining [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 67-68.
- [17] 张文泉, 李加祥, 温兴林. 缓倾斜煤层底板采动破坏深度与回采参数关系的研究[J]. 山东矿业学院学报, 1993, 12(1): 45-49.
- ZHANG Wenquan, LI Jiaxiang, WEN Xinglin. Research on the relationship between the mining parameters and the broken depth of the floor of gently-inclined seams[J]. Journal of Shandong Institute of Mining & Technology, 1993, 12(1): 45-49.
- [18] 姜福兴, XUN Luo, 杨淑华. 采场覆岩空间破裂与采动应力场的微震探测研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 23-25.
- JIANG Fuxing, XUN Luo, YANG Shuhua. Microseismic monitoring study on spatial structure of overlying strata and mining pressure field in longwall face[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1): 23-25.
- [19] 姜福兴, 叶根喜, 王存文, 等. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1932-1933.
- JIANG Fuxing, YE Genxi, WANG Cunwen, et al. Application of high-precision microseismic monitoring technique to water intrush monitoring in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1932-1933.
- [20] 孔令海, 姜福兴, 杨淑华, 等. 基于高精度微震监测的特厚煤层综放工作面顶板运动规律[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(5): 552-558.
- KONG Linghai, JIANG Fuxing, YANG Shuhua, et al. Movement of roof strata in extra-thick coal seams in top-coal caving mining based on a high precision micro-seismic monitoring system[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(5): 552-558.