

# 基于未确知测度理论的崩矿步距优选模型

余健, 朱飞

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

**摘要** 无底柱分段崩落法的分段高度、进路间距和崩矿步距的不同组合,严重影响放矿损失贫化指标,从而影响了矿山的经济效益。本文运用未确知测度理论和层次分析法,建立单位精矿盈利的评价模型。评价模型综合考虑了影响单位精矿盈利的各种因素,如贫化率、回收率、混入废石的品位和尾矿品位等。利用实测数据建立单指标未确知测度矩阵,然后通过层次分析法(AHP)计算出各指标因素的权重,依照置信度识别准则对单位精矿盈利进行评级,进而对崩矿步距进行优选。实例分析结果显示,大红山铁矿 440 分层崩矿步距为 4.8m 时,单位精矿盈利为优,从而确定为最优崩矿步距。

**关键词** 崩矿步距;单位精矿盈利;未确知测度;层次分析法

**中图分类号** TD853.36

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.35.004

## Breaking Interval Preferred Model Based on Uncertainty Measurement Theory

YU Jian, ZHU Fei

School of Resources & Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract** Different combinations of segment height, route spacing and breaking interval have a significant effect on the indicators of the depleted ore loss, thus affecting the mining economic benefits. In this paper, the uncertainty measurement theory and the AHP (Analytical Hierarchy Process) are used to establish an evaluation model of the unit concentrate earnings. The evaluation model takes account of various factors that affect the unit concentrate earnings, such as the dilution rate, the recovery rate, the grade of the rock mixed with waste rock and the grade of tailings. The measured data are used to create a single index unascertained measurement matrix, then calculate the weight of each index by the AHP and evaluate the unit concentrate earnings according to the credible degree recognition criteria, thus determine the preferred caving step. In examples, the unit concentrate earnings are optimal when the breaking interval is 4.8m for the 440 stratified of Dahongshan Iron, and the step for the optimal breaking interval is determined.

**Keywords** breaking interval; unit concentrate earnings; uncertainty measurement; analytical hierarchy process

### 0 引言

无底柱分段崩落法是一种安全、高效、机械化程度高的采矿方法<sup>[1]</sup>,其典型方案最早在瑞典 Kiruna 铁矿山使用。由于显著的优点,无底柱分段崩落法在世界金属矿山得到了迅速的推广,特别是铁矿山的的应用更为广泛<sup>[2]</sup>。由于这种采矿方法在岩石覆盖条件下放矿,矿石的贫化损失问题严重<sup>[3,4]</sup>,降低贫化损失是矿山企业追求的目标。由放矿学理论可知,无底柱分段崩落法的贫化损失是由分段高度、进路间距及崩矿步距决定的。崩矿步距应与分段高度和回采进路间距相匹配,但在矿山的实际生产中,分段高度及进路间距的确定往往受到矿山地质、采矿设备等诸多条件的制约,不易调整,而

崩矿步距却可以多变<sup>[5,6]</sup>,崩矿步距直接影响矿石的回收率和贫化率等,从而影响单位矿石的盈利。所以,对单位矿石的盈利进行评价,可以为崩矿步距的选择提供可靠的依据。

在崩矿步距方面,已有很多研究。余健等<sup>[7,8]</sup>推导出无底柱分段崩落法中矿石的贫化率和回收率关于崩矿步距的函数,在此基础上结合工程实例研究出采用“回贫差”作为目标函数来确定崩矿步距。但是,从经济效益方面确定崩矿步距的研究很少,未确知测度理论为此提供了一个较好的途径。

未确知数学理论<sup>[9]</sup>由王光远于 1990 年提出,该理论已广泛运用于社会科学和自然科学<sup>[10,11]</sup>。在未确知数学的应用研究中,成果最多的是未确知测度评价模型的应用。而层次分析

收稿日期: 2013-05-08;修回日期: 2013-06-29

基金项目: 云南省省院省校科技合作计划重大项目(2003UDBEA01A052)

作者简介: 余健,教授,研究方向为无轨机械化采矿工艺与技术,电子信箱: zxs143@163.com



法(AHP)能够把复杂系统问题的各因素,通过划分相互联系的各有序层次,使之条理化,根据对一定客观现实的判断就每一层次相对重要性给予定量表示,利用数学方法确定表达每一层次的全部元素的相对重要次序的权值<sup>[12-14]</sup>。本文利用未确知测度理论<sup>[15]</sup>和层次分析法<sup>[16]</sup>,构建单位精矿盈利的模型,综合考虑工业储存矿石品位、贫化率、回收率、混入废石品位、尾矿品位、精矿品位、采场放矿前单位矿石已付费用、采矿放矿及放出后单位矿石费用和精矿卖价等9个指标的影响,为崩矿步距的选择提供可靠的依据。

### 1 未确知测度理论与层次分析法

#### 1.1 未确知测度理论原理

设评价对象集  $X=\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , 评价指标集  $I=\{I_1, I_2, \dots, I_m\}$ 。若  $x_{ij}$  表示第  $i$  个评价对象  $X_i$  关于第  $j$  个评价指标  $I_j$  的测量值, 则有  $m$  维向量  $X_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ 。设评价等级空间  $U=\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ , 第  $k$  个评价等级  $C_k$  为  $x_{ij}$  的等级值; 设第  $k$  级比第  $k+1$  级危险性大(或安全程度高), 记为  $C_k > C_{k+1}$ , 若  $C_1 > C_2 > \dots > C_p$ , 或  $C_1 < C_2 < \dots < C_p$ , 则称  $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$  是  $U$  的一个有序分割类。 $\mu_{jk}=\mu(x_{ij} \in C_k)$  表示测量值  $x_{ij}$  属于第  $k$  个评价等级  $C_k$  的程度, 且  $\mu$  满足:  $0 \leq \mu(x_{ij} \in C_k) \leq 1$

$$i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, p \quad (1)$$

$$\mu(x_{ij} \in U)=1 \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$\mu \left| x_{ij} \in \bigcup_{l=1}^k C_l \right| = \sum_{l=1}^k \mu(x_{ij} \in C_l) \quad k=1, 2, \dots, p \quad (3)$$

称式(2)为归一性, 式(3)为可加性。满足式(1)~(3)的  $\mu$  称为未确知测度, 简称测度<sup>[11]</sup>。

#### 1.2 单指标未确知测度矩阵的确定

构造单指标测度函数  $\mu(x_{ij} \in C_k) (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, p)$ , 求出对象  $X_i$  的各个指标测度值  $\mu_{jk}$ , 则称  $(\mu_{jk})_{n \times p}$  为单指标测度评价矩阵<sup>[17]</sup>, 即

$$(\mu_{jk})_{n \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \dots & \mu_{1p} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \dots & \mu_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \dots & \mu_{np} \end{bmatrix} \quad (4)$$

#### 1.3 层次分析法确定指标权重

(1) 比较标度的构造。

依据两两比较的标度和判断原理, 可得出 1~9 级的比较标准<sup>[18]</sup>, 见表 1。2、4、6、8 级分别为两相邻判断的中间值; 若  $X_i$  因素与  $X_j$  比较得  $W_{ij}$ , 则因素  $X_j$  与  $X_i$  比较得  $1/W_{ij}$ 。

表 1 比较标准意义

Table 1 Meaning of the comparison standards

标准	定义	说明
1	同样重要	因素 $X_i$ 与 $X_j$ 的重要性相同
3	稍微重要	因素 $X_i$ 的重要性稍微高于 $X_j$
5	明显重要	因素 $X_i$ 的重要性明显高于 $X_j$
7	强烈重要	因素 $X_i$ 的重要性强烈高于 $X_j$
9	绝对重要	因素 $X_i$ 的重要性绝对高于 $X_j$

(2) 构造比较判断矩阵。

根据层次模型, 每一层都以上一层为基准, 两两比较构造判断矩阵, 则有判断矩阵

$$D = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1n} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{n1} & W_{n2} & \dots & W_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{W_1}{W_1} & \frac{W_1}{W_2} & \dots & \frac{W_1}{W_n} \\ \frac{W_2}{W_1} & \frac{W_2}{W_2} & \dots & \frac{W_2}{W_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{W_n}{W_1} & \frac{W_n}{W_2} & \dots & \frac{W_n}{W_n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

由上述方法得到的判断矩阵  $D$ , 解特征根问题:  $DW = \lambda_{\max} W$ , 所得到的  $W$  经正规化处理作为因素的排序权重。可以证明, 其最大特征根  $\lambda_{\max}$  存在且唯一。然而, 对  $D$  只能求近似值, 得不到精确的特征值和特征向量  $W^A$ <sup>[19]</sup>。本文采用方根法进行近似计算。

① 将判断矩阵  $D$  的元素按行相乘, 得到各行元素乘积  $M_i$ :

$$M_i = \prod_{j=1}^n W_{ij} \quad (6)$$

② 计算  $M_i$  的  $n$  次方根

$$\bar{W}_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (7)$$

③ 向量  $W$  正规化

$$W_i = \bar{W}_i / \sum_{j=1}^n \bar{W}_j \quad (8)$$

④ 判断矩阵的最大特征根计算

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(DW)_i}{nW_i} \quad (9)$$

(3) 矩阵的一致性检验。

为了使判断结构更加准确, 需进行一致性检验。判断矩阵的一致性检验公式为:  $C_r = C/I$ , 其中  $C_i$  为检验指标,  $G = (\lambda_{\max} - n)/(n-1)$ ,  $n$  为判断矩阵的阶数,  $R_1$  为平均随机一致性指标(取值见表 2)。

表 2 平均随机一致性指标取值

Table 2 Values of average stochastic coincidence indicators

判断矩阵除数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_1$	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

当  $C_r < 0.1$  时, 判断矩阵  $D$  符合一致性检验, 否则需要调整判断矩阵, 直至满足要求为止。

(4) 权重向量的计算。

在判断矩阵满足一致性检验的条件下, 求出各层因素的权重向量。

#### 1.4 预测矩阵的确定

如果存在  $\mu_k$ , 满足  $0 \leq \mu_k \leq 1, \mu_k = \sum_{i=1}^n W_i \cdot \mu_{ik} (k=1, 2, \dots, p)$ , 则称  $(\mu_k)_{n \times p}$  为预测矩阵, 即

$$(\mu_{ik})_{exp} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1p} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \cdots & \mu_{np} \end{bmatrix} \quad (10)$$

1.5 预测结果判断

为了得出最终预测结果,引入置信度评价准则。设  $\lambda$  为置信度 ( $\lambda \geq 0.5$ , 通常取  $\lambda=0.5$  或  $0.6$ ), 若  $C_1 > C_2 > \cdots > C_p$ , 且令

$$p_0 = \min \left| p: \sum_{i=1}^p \mu_{ii} > \lambda, i=1, 2, \dots, n \right| \quad (11)$$

则认为评价对象的风险等级为  $C_{p_0}$ 。

2 单位精矿盈利评价指标体系

2.1 单位精矿盈利评价指标体系的建立

判断矿山经济效益的最佳标准是采出矿石盈利总额最大,但盈利总额计算繁杂,常以单位矿石盈利额作为标准,以大者为优。影响盈利额的因素很多,尤其以贫化率和回收率

影响较大,而贫化率和回收率又受崩矿步距的影响。建立单位精矿盈利评价指标体系,旨在通过评价在某一崩矿步距时矿山的经济效益,对崩矿步距的选择进行合理评价,为矿山选择崩矿步距提供可靠的依据。

本文构建单位精矿盈利评价体系,在评价过程中,综合考虑了工业储存矿石品位  $I_1$ 、贫化率  $I_2$ 、回收率  $I_3$ 、混入废石品位  $I_4$ 、尾矿品位  $I_5$ 、精矿品位  $I_6$ 、采场放矿前单位矿石已付费用  $I_7$ 、采场放矿及放出后单位矿石已付费用  $I_8$  和精矿卖价等 9 个指标的影响,但是精矿的卖价受精矿品位的影响,近似为一次函数关系,因此可用精矿品位代替,实际分级指标为 8 个。参考大量相关文献,通过赋值的方法将定性指标转化为半定量指标,使其能够参与到模型的构建中,以得到较为准确的预测结果。运用分级标准化法将每个指标分为 3 级,评价等级集为  $\{C_1, C_2, C_3\}$ , 即 I 级、II 级和 III 级,分别表示盈利优、良和中。每级都根据专家经验设置一个取值标准,分级标准见表 3。

对应的定量指标单指标测度函数分别如图 1~图 8 所示。

表 3 单位精矿盈利评价体系的定量指标分级标准

Table 3 Classification criterion of quantitative indexes in unit concentrate earnings

影响程度 分级	$I_1/\%$	$I_2/\%$	$I_3/\%$	$I_4/\%$	$I_5/\%$	$I_6/\%$	$I_7/\text{元}$	$I_8/\text{元}$
I 级 ( $C_1$ )	$\geq 45$	$\leq 10$	$\geq 85$	$\leq 15$	$\leq 10$	$\geq 65$	$\leq 25$	$\leq 55$
II 级 ( $C_2$ )	$> 35$ $< 45$	$> 10$ $< 20$	$> 80$ $< 85$	$> 15$ $< 20$	$> 10$ $< 15$	$> 55$ $< 65$	$> 25$ $< 40$	$> 60$ $< 70$
III 级 ( $C_3$ )	$\leq 35$	$\geq 20$	$\leq 80$	$\geq 20$	$\geq 15$	$\leq 55$	$\geq 40$	$\geq 70$

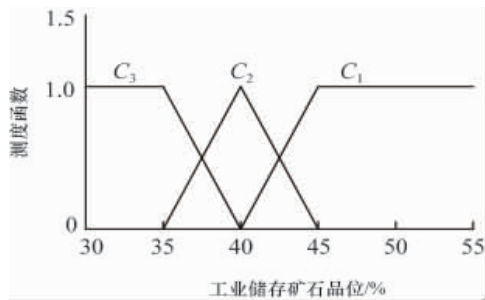


图 1 工业储存矿石品位单指标测度函数

Fig. 1 Uncertainty measurement function of the industrial storage ore grade

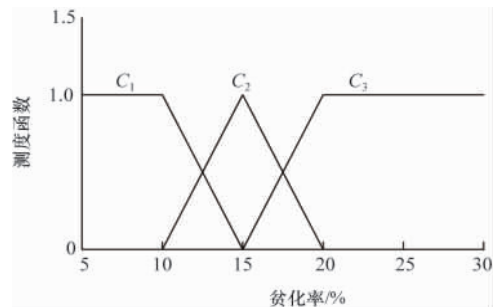


图 2 贫化率单指标测度函数

Fig. 2 Uncertainty measurement function of dilution rate

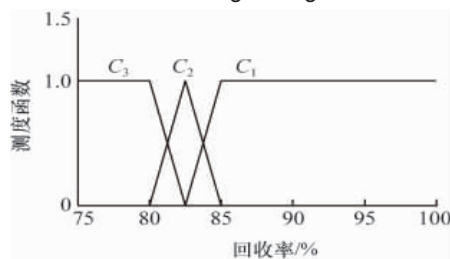


图 3 回收率单指标测度函数

Fig. 3 Uncertainty measurement function of recoveries

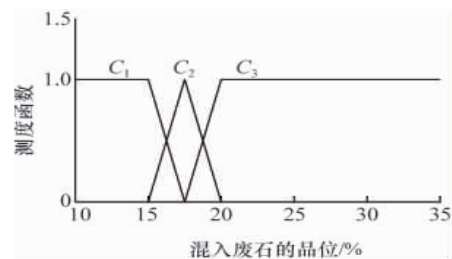


图 4 混入废石品位单指标测度函数

Fig. 4 Uncertainty measurement function of mixed waste rock grade

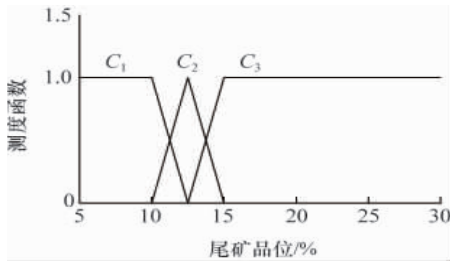


图 5 尾矿品位单指标测度函数

Fig. 5 Uncertainty measurement function of tailings grade

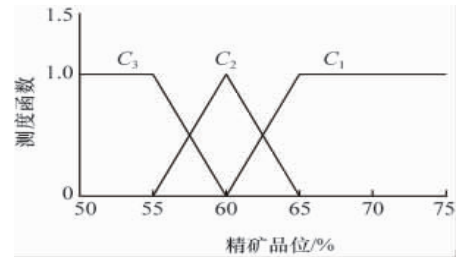


图 6 精矿品位单指标测度函数

Fig. 6 Uncertainty measurement function of concentrate grade

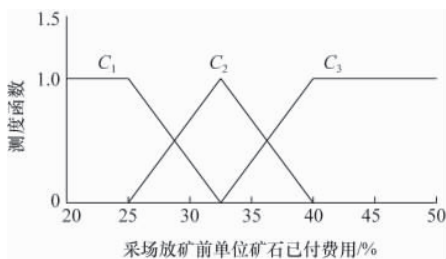


图 7 采场放矿前单位矿石已付费用单指标测度函数

Fig. 7 Uncertainty measurement function of the unit ore before stope ore with the fees paid

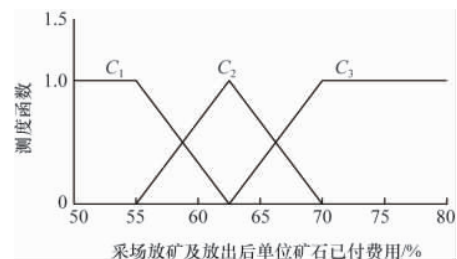


图 8 采场放矿及放出后单位矿石已付费用单指标测度函数

Fig. 8 Uncertainty measurement function of the unit ore in mining and release with the fees paid

2.2 工程实例验证

大红山铁矿是国内利用无底柱分段崩落法的典型矿山之一,结合矿石实际情况,440 分层采用的崩矿步距为 4.8m。现运用上述建立的单位精矿盈利评价指标体系对 440 分层采出的矿石进行经济评价,即在崩矿步距为 4.8m 时,采出的矿石单位精矿盈利进行经济效益的评价,论证此崩矿步距时,采出的矿石的经济效益是否最好。查阅相关论文和咨询相关矿山专家得到的评价对象各指标统计值为: $I_1=47%$ , $I_2=5.37%$ , $I_3=84.36%$ , $I_4=17%$ , $I_5=15%$ , $I_6=63%$ , $I_7=30$  元, $I_8=65$  元。将统计值代入图 1~图 7 对应的未确知测度函数中,得到相应的未确知测度矩阵

$$(\mu_{jk})_{8 \times 3} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0.74 & 0.26 & 0 \\ 0.2 & 0.8 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0.33 & 0.67 & 0 \\ 0 & 0.67 & 0.33 \end{pmatrix} \quad (12)$$

2.2.1 指标权重的计算

(1) 根据式(5)得到判断矩阵为

$$D = \begin{pmatrix} 1 & \frac{4}{3} & \frac{4}{3} & \frac{8}{5} & 8 & 2 & \frac{8}{3} & \frac{8}{3} \\ \frac{3}{4} & 1 & 1 & \frac{6}{5} & 6 & \frac{3}{2} & 2 & 2 \\ \frac{3}{4} & 1 & 1 & \frac{6}{5} & 6 & \frac{3}{2} & 2 & 2 \\ \frac{5}{8} & \frac{5}{6} & \frac{5}{6} & 1 & 5 & \frac{5}{4} & \frac{5}{3} & \frac{5}{3} \\ \frac{1}{8} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{2} & \frac{2}{3} & \frac{2}{3} & \frac{4}{5} & 4 & 1 & \frac{4}{3} & \frac{4}{3} \\ \frac{3}{8} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{3}{5} & 3 & \frac{3}{4} & 1 & 1 \\ \frac{3}{8} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{3}{5} & 3 & \frac{3}{4} & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

(2) 根据式(6)~(9)得到大红山铁矿 440 分层采单位精矿盈利评价体系各指标权重为

$$W = (0.2222, 0.1667, 0.1667, 0.1389, 0.0278, 0.1111, 0.0833, 0.0833) \quad (14)$$

(3) 利用 Matlab<sup>®</sup>对矩阵  $D$  求出最大特征根,并将其代入一致性检验公式,计算得: $C_r=0.0015 < 0.1$ ,即满足一致性检验,结果可信。

### 2.2.2 预测结果

由式(10)代入数据得到预测矩阵

$$(\mu_{ik})_{1 \times 3} = [0.6342 \quad 0.3383 \quad 0.0275] \quad (15)$$

根据文献[21],选取置信度  $\lambda=0.6$ ,由式(11)可知大红山铁矿 440 分层单位精矿盈利评价等级为 I 级,在崩矿步距为 4.8m 时,经济效益为优。

### 3 结论

(1) 综合考虑影响单位精矿盈利的各个因素,特别是崩矿步距对回收率、贫化率等的影响,从而建立了单位精矿盈利评价体系,为研究矿山经济效益提出了一种科学、系统的方法。

(2) 把未确知测度理论和层次分析法相结合,建立经济效益评价体系,使预测更科学、更合理。

(3) 将建立的单位精矿盈利评价体系运用到大红山铁矿,评价结果表明,大红山铁矿 440 分层采用崩矿步距为 4.8m 时,单位精矿盈利为 I 级,即优。该评价体系可以为采用无底柱分段崩落法的矿山选择崩矿步距提供可靠的依据。

#### 参考文献 (References)

- [1] 刘兴国. 放矿理论基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.  
Liu Xingguo. Ore drawing theory[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995.
- [2] 孙光华, 吕广忠. 我国无底柱分段崩落法的发展方向[J]. 河北理工学院学报, 2007, 29(2): 4-6.  
Sun Guanghua, Lü Guangzhong. Journal of Institute of Technology, 2007, 29(2): 4-6.
- [3] 王文杰, 任凤玉. 无底柱分段崩落法矿石贫化原因分析[J]. 中国矿业, 2008, 17(3): 69-72.  
Wang Wenjie, Ren Fengyu. China Mining Magazine, 2008, 17(3): 69-72.
- [4] Freidin A M, Neverov S A, Neverov A A, et al. Mine stability with application of sublevel caving schemes[J]. Journal of Mining Science, 2008, 44(1): 82-91.
- [5] Bull G, Page C H. Sublevel caving-today's dependable low-cost Ore factory [C]//MassMin 2000 Proceedings. Brisbane: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2000: 537-556.
- [6] Henry E, Lindqvist C D. Footwall stability at the LKAB's Kiruna sublevel caving operation, Sweden [C]// Mass Min 2000 Proceedings. Brisbane, Australia: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2000: 527-533.
- [7] 余健, 杨正松. 端部放矿贫化损失的预测[J]. 金属矿山, 2009(10): 70-73.  
Yu Jian, Yang Zhengsong. Metal Mine, 2009(10): 70-73.
- [8] 余健, 刘培慧. 高分段大间距结构合理崩矿步距研究[J]. 矿业研究与开发, 2008(6): 10-12.  
Yu Jian, Liu Peihui. Mining Research and Development, 2008, 28(6): 10-12.
- [9] 王光远. 论未确知性信息及其数学处理[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1990, 23(4): 52-58.  
Wang Guangyuan. Journal of Harbin Architecture and Engineering Institute, 1990, 23(4): 52-58.
- [10] 刘开第, 吴和琴, 庞彦军, 等. 不确定性信息数学处理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.  
Liu Kaidi, Wu Heqin, Pang Yanjun, et al. Mathematics treatment and application of uncertainty information[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [11] 宫凤强, 李夕兵, 董陇军, 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. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 323-330.
- [12] 罗一忠, 吴爱祥, 胡国斌, 等. 采场人-机-环境系统可靠性模糊综合评价[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(4): 804-809.  
Luo Yizhong, Wu Aixiang, Hu Guobin, et al. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2006, 37(4): 804-809.
- [13] 许传华, 任青文. 地下工程围岩稳定性的模糊综合评判法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1852-1855.  
Xu Chuanhua, Ren Qingwen. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1852-1855.
- [14] 王新民, 赵彬, 张钦礼. 基于层次分析和模糊数学的采矿方法选择[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(5): 875-880.  
Wang Xinmin, Zhao Bin, Zhang Qinli. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2008, 39(5): 875-880.
- [15] 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. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(2): 101-103.
- [16] 李俊芳, 吴小萍. 基于 AHP-FUZZY 多层次评判的城市轨道交通线网规划方案综合评价[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 4(2): 205-208.  
Li Junfang, Wu Xiaoping. Journal of Wuhan Engineering University, 2007, 4(2): 205-208.
- [17] 李如忠, 洪天求, 熊鸿斌, 等. 基于未确知数学理论的沉积物重金属污染评价模式[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2167-2172.  
Li Ruzhong, Hong Tianqiu, Xiong Hongbin, et al. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(6): 2167-2172.
- [18] 黄贯虹, 方刚. 系统工程方法与应用[M]. 广州: 暨南大学出版社, 2005.  
Huang Guan hong, Fang Gang. System engineering method and application [M]. Guangzhou: Jinan University Press, 2005.
- [19] 许宝田, 阎长虹, 许宏发, 等. 基于模糊理论的软岩弹性模型识别及参数反分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 11: 2280-2286.  
Xu Baotian, Yan Changhong, Xu Hongfa, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 11: 2280-2286.
- [20] 苏金明, 阮沈勇. MATLAB 6.1 应用指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.  
Sun Jinming, Ruan Shenyong. MATLAB 6.1 application guide [M]. Beijing: Publication House of Electronics Industry, 2002.
- [21] 刘开第, 庞彦军, 孙光勇, 等. 城市环境质量的未确知测度评价[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(12): 52-58.  
Liu Kaidi, Pang Yanjun, Sun Guangyong, et al. Systems Engineering: Theory and Practice, 1999, 19(12): 52-58.

(责任编辑 侯澄芝, 马宇红)