

# 境界顶柱安全评价未确知测度模型及其应用

周科平, 田坤, 邓红卫, 封越

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

**摘要** 运用未确知测度理论, 建立露天转地下境界顶柱安全性评价模型。从露天转地下矿山的地质条件和工程状况出发, 选取境界顶柱厚度、抗压强度、抗拉强度、露天坑深度、节理分布、地下矿采矿方法和露天坑积水 7 项指标作为判别指标。根据实际情况建立未确知测度函数, 采用信息熵理论获得各判别指标的权重, 并依照置信度识别准则进行等级判定, 最后得出境界顶柱的安全评价结果。采用该评价模型对新桥硫铁矿、石人沟铁矿和获各琦铜矿 3 座典型的露天转地下矿山境界顶柱的安全性进行评价, 评价结果与已经完成露天转地下矿山的境界顶柱实际情况符合较好, 因此, 根据评价模型的评价结果, 推断新桥硫铁矿采用的境界顶柱方案是可行的。研究表明, 此安全评价模型可行, 为境界顶柱安全性评价提供了一种有效的方法。

**关键词** 露天转地下; 境界顶柱; 安全评价; 未确知数学; 未确知测度模型; 置信度识别

**中图分类号** TD327

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.23.005

## Application of Boundary Pillar Safety Evaluation Model Based on Unascertained Measurement Theory

ZHOU Keping, TIAN Kun, DENG Hongwei, FENG Yue

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

**Abstract** Based on the unascertained measurement theory, a safety evaluation model of the boundary pillar is built. Under the geological conditions and the engineering situation of the mine, which goes from an open-pit to the underground mine. 7 main factors that influence the stability of the boundary pillar are taken into consideration, including the thickness of the boundary pillar, the compressive strength of the ore, the tensile strength of the ore, the open-pit depth, the joint distribution, the mining method of the underground mine and the seeper of the open-pit. The unascertained measurement function is obtained based on the actual situation of the mine; the weights of all indexes are calculated by using the entropy theory, the safety evaluation results of the boundary pillar can be obtained based on the credible degree recognition criteria. Using this model, the safety of the boundary pillars of three typical mines is evaluated. It is indicated that the unascertained measurement assessment results agree well with the actual records, and the scheme of the Xinqiao Mine's boundary pillar is feasible. The results show that this model provides an effective method to evaluate the safety of the boundary pillar. The establishment of the uncertainty safety evaluation model highly depends on the grading standards and there is no uniformly accepted grading standards yet, further studies are needed to solve this problem.

**Keywords** transfer open-pit into underground mining; boundary pillar; safety evaluation; unascertained mathematics; unascertained measurement model; credible degree recognition

### 0 引言

近些年来,随着地表浅层资源逐渐枯竭,金属矿山开始由露天生产向地下生产转化。露天转地下是一个复杂的工程,在转化的过程中露天边坡稳定性分析<sup>[1]</sup>及露天坑开采结

束后的回填<sup>[2]</sup>都是受到关注和需要解决的问题。露天转地下开采后期,存在一个露天向地下开采的过渡阶段。在这段时间内(一般 3—5 年或更长),通常是通过预留境界顶柱的方式确保露天和地下同时生产作业的安全<sup>[3-4]</sup>。

收稿日期: 2012-05-28; 修回日期: 2012-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51074178); 中南大学前沿研究计划项目(2010QZZD001)

作者简介: 周科平, 教授, 研究方向为金属矿安全高效开采、深部岩石力学与工程、矿业经济与系统工程等, 电子信箱: kpzhou@263.net

境界顶柱厚度确定是一个非常重要和复杂的课题。顶柱太厚,会造成资源损失,降低矿山经济效益;如果太薄,则对地下矿生产留下安全隐患。国内研究较多的是露天转地下境界顶柱厚度的确定方法,取得了许多成果,汪茂华和余仁兵采用 Flac3D 软件模拟了铜绿山矿地下矿开挖过程中境界顶柱和采场的变形和破坏情况,为露天转地下境界顶柱厚度与采场尺寸设计施工提供了参考依据<sup>[9]</sup>。马天辉等<sup>[6]</sup>采用 MSC.Patran 和 MAC.Mastran 三维数值模拟软件对石人沟铁矿建模分析。南世卿等<sup>[7]</sup>采用 RFPA 对在断层影响下境界顶柱的稳定性进行了二维数值模拟分析。但数值模拟方法存在一定局限性,即建模时由于计算机及软件的限制,不能真实地反应计算原型的地质情况,也无法综合考虑多种因素耦合作用下境界顶柱的安全性。对境界顶柱方案进行安全评价有助于矿山确定合理的境界顶柱厚度,这对于矿山的经济效益和安全生产都有重大的意义,但国内尚缺乏境界顶柱的安全评价研究。

在安全评价中已取得很多成果,王新民等采用灰色关联分析法对采空区的危险性进行评价<sup>[8]</sup>;蒋卫东等<sup>[9-10]</sup>基于灰色定权聚类对空区上部地表的稳定性评价分析;丁向东等<sup>[11]</sup>采用人工神经网络原理建立岩爆分类和预测的神经网络模型;梁缙等<sup>[12]</sup>采用模糊数学建立了加油站安全评价模型。境界顶柱的影响因素众多并具有不确定性和隐蔽性,一些因素难以进行量化。传统的安全评价方法,评价指标较单一并且指标权重难以确定且容易受到人为因素干扰。未确知信息及其数学处理理论最早是由王光远<sup>[13]</sup>于 1990 年提出的,它是一种不同于模糊信息、随机信息和灰色信息的新的不确定性信息处理方法。笔者借鉴未确知测度评价预测模型的理论 and 思想,建立基于未确知理论的境界顶柱安全评价模型,运用熵权理论<sup>[14-17]</sup>确定出影响境界顶柱安全的各指标的权重,并采用置信度识别准则判别评价,展开了境界顶柱安全性评价研究。

### 1 未确知测度理论

设需要安全评价的评价对象  $X$  有  $n$  个,评价对象空间为  $X=\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , 一个评价对象  $X_i (i=1, 2, \dots, n)$  有  $m$  个评价指标,其指标空间为  $\varphi_j$ , 则  $X_i$  表示一个  $m$  维向量  $X_i=\{\varphi_{i1}, \varphi_{i2}, \dots, \varphi_{im}\}$ ,  $\varphi_{ij}$  为评价对象  $X_i$  关于评价指标  $\varphi_j$  的测评值。对于每一个测评值  $\varphi_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ , 假设有  $p$  个评价等级  $\{R_1, R_2, \dots, R_p\}$ 。

评价空间记作  $U$ , 则有  $U=\{R_1, R_2, \dots, R_p\}$ , 设  $R_k (k=1, 2, \dots, p)$  为第  $k$  个评价等级,且  $k$  级比  $k+1$  级危险等级“高”,记作  $R_k > R_{k+1}$ 。若满足  $R_1 > R_2 > \dots > R_p$ , 称  $\{R_1, R_2, \dots, R_p\}$  是评价空间  $U$  的有序分隔类<sup>[13]</sup>, 在境界顶柱的安全性评价中,评价等级空间中,前一等级的危险性大于后一等级。

#### 1.1 单指标测度

若  $\mu_{jk}=\mu(\varphi_j \in R_k)$  表示测量值  $\varphi_j$  属于第  $k$  个评价等级  $R_k$  的程度,且要求满足

$$0 \leq \mu(\varphi_j \in R_k) \leq 1 \quad (1)$$

$$\mu(\varphi_j \in U) = 1 \quad (2)$$

$$\mu\left(\varphi_j \in \bigcup_{l=1}^k R_l\right) = \sum_{l=1}^k \mu(\varphi_j \in R_l) \quad k=1, 2, \dots, p \quad (3)$$

式(2)称为“归一性”,式(3)称为“可加性”。满足式(1)~(3)的  $\mu$  称为未确知测度,简称测度<sup>[13]</sup>。

称矩阵  $(\mu_{ijk})_{m \times p}$  为单指标测度评价矩阵,即

$$(\mu_{ijk})_{m \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{i11} & \mu_{i12} & \dots & \mu_{i1p} \\ \mu_{i21} & \mu_{i22} & \dots & \mu_{i2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_{im1} & \mu_{im2} & \dots & \mu_{imp} \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 1.2 指标权重确定

各评价指标权重的确定采用信息熵理论,设  $\omega_j$  表示测量指标  $\varphi_j$  相对于其他指标的重要程度,要求  $\omega_j$  满足:  $0 \leq \omega_j \leq 1$ , 且  $\sum_{j=1}^m \omega_j = 1$ , 称  $\omega_j$  为  $\varphi_j$  的权重,  $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}$  称为指标权重向量。采用熵确定权重<sup>[15]</sup>, 即

$$\nu_j = 1 + \frac{1}{\lg p} \sum_{i=1}^p \mu_{ij} \lg \mu_{ij} \quad (5)$$

$$\omega_j = \frac{\nu_j}{\sum_{i=1}^n \nu_i} \quad (6)$$

因为单指标测度评价矩阵式(4)为已知,可以通过式(5)、(6)求出  $\omega_j$ 。

### 1.3 多指标权重确定

令  $\mu_{ik}=\mu(X_i \in R_k)$  为评价对象  $X_i$  属于第  $k$  个评价指标  $R_k$  的程度,即为权重,则有

$$\mu_{ik} = \sum_{j=1}^m \omega_j \mu_{ijk} \quad i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, p \quad (7)$$

并且  $0 \leq \mu_{ik} \leq 1$ , 则称  $\mu_{ik}$  为多指标未确知测度矩阵。

$\mu_{ik} = \{\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{ip}\}$  为  $X_i$  的多指标未确知测度评价向量。

### 1.4 置信度识别准则

采用“置信度”识别准则对评价对象进行评价。设  $\lambda$  为置信度 ( $\lambda \geq 0.5$ , 通常为 0.6 或 0.7), 若  $R_1 > R_2 > \dots > R_p$ , 且令

$$k_0 = \min \left| k: \sum_{i=1}^k \mu_i > \lambda, k=1, 2, \dots, p \right| \quad (8)$$

则可以判断评价对象属于第  $k_0$  个评价等级  $R_{k_0}$ 。

## 2 境界顶柱安全评价指标体系

### 2.1 安全性评价指标选取和分级

建立合理的安全评价指标体系是能否准确可靠地对境界顶柱安全性进行评价的关键,境界顶柱安全性的影响因素很多,根据相关研究<sup>[18-22]</sup>,选取矿岩的抗压强度、矿岩的抗拉强度、露天坑深度、节理分布、地下矿采矿方法、露天坑积水、境界顶柱厚度和地下矿采矿方法 7 种指标作为境界顶柱安全评价的影响因子,其中评价指标地下矿采矿方法、露天坑积水和节理分布采用半定量的方法进行取值。将每个指标分

成 4 个等级, 指标的评价集为  $\{R_1, R_2, R_3, R_4\}$  (即 I, II, III, IV), 分别表示为极不安全、不安全、较安全和安全。安全性评价指标的分级标准如表 1 和表 2 所示。

**表 1 境界顶柱安全性评价定量指标的分级标准**  
Table 1 Classification criterion of quantitative indexes for safety of boundary pillar

影响程度 分级	定量指标			
	境界顶柱 厚度/m	矿岩抗压 强度/MPa	矿岩抗拉 强度/MPa	露天坑深 度/m
I( $R_1$ )	<15	<60	<6	>200
II( $R_2$ )	15—20	60—80	6—8	150—200
III( $R_3$ )	20—25	80—100	8—10	100—150
IV( $R_4$ )	>25	>100	>10	<100

**表 2 境界顶柱安全性评价定性指标的分级标准**  
Table 2 Classification criterion of qualitative indexes for safety of boundary pillar

影响程 度分级	定性指标			
	赋值	节理分布	地下矿采矿方法	露天坑积水
I( $R_1$ )	1	很发育	空场法	一直有积水
II( $R_2$ )	2	较发育	留矿法	雨季有积水
III( $R_3$ )	3	发育	嗣后充填法	偶有积水
IV( $R_4$ )	4	不发育	分层充填法	无积水

2.2 境界顶柱安全评价单指标测度函数

由单指标测度函数的定义和各评价指标的分级标准构建单指标测度函数, 测度函数如图 1 所示。

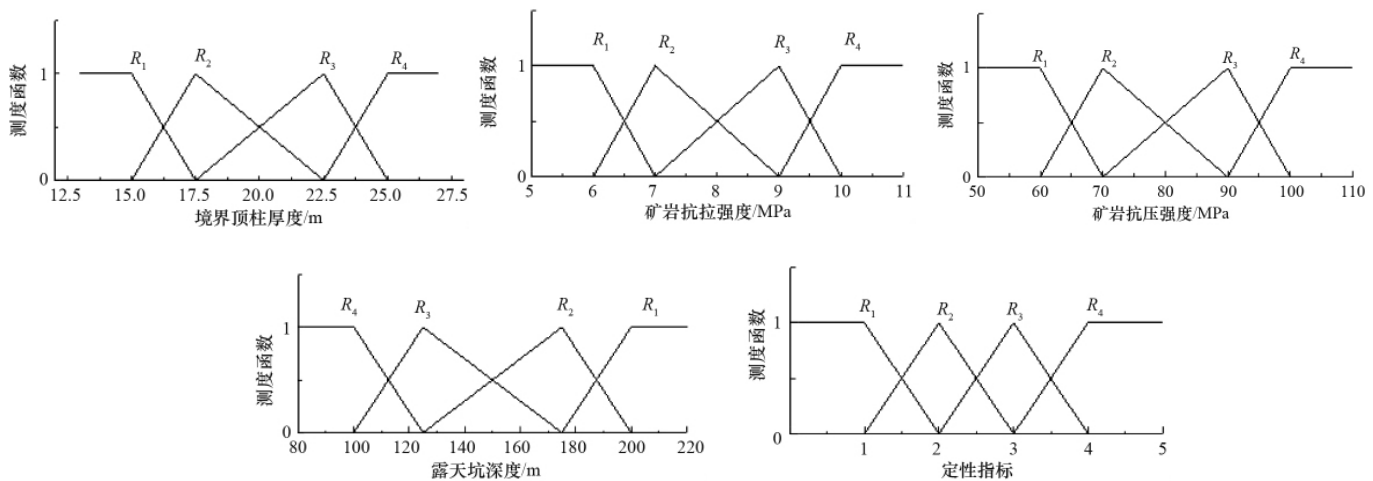


图 1 单指标测度函数  
Fig. 1 Uncertainty measurement function

3 工程实例

安徽省新桥矿业有限公司(简称“新桥硫铁矿”)是一座以硫为主, 伴生铜、金、银、铁、铅、锌等多种金属元素的大型露天、地下联合开采的矿山。随着开采深度的不断加大, 已接近露天开采最终境界。为了实现矿山露天转地下开采的安全平稳过渡, 矿山决定在露天坑地预留厚度为 24m 的境界顶柱, 因此评估该境界顶柱的厚度是否合理以及该顶柱安全性是否可靠, 对于确保矿山的安全生产有重要意义。

利用基于未确知测度理论的境界顶柱评价模型对新桥硫铁矿境界顶柱的安全性进行评价, 同时还对国内的石人沟铁矿和获各琦铜矿 2 座典型的露天转地下矿山的境界顶柱安全性进行评价, 进一步验证本评价模型的准确性和可信度。根据调查取值, 3 座矿山的境界顶柱安全性评价指标统计如表 3 所示。

将 3 座矿山境界顶柱各评价指标植入如图 1 所示的单指标测度函数中, 计算求得每个矿山的单指标评价矩阵, 结

**表 3 各矿山境界顶柱安全性评测指标统计**  
Table 3 Estimation and measured data of boundary safety evaluation indexes of mine

矿山名称	境界顶柱安全性评价指标						
	境界顶柱厚度/m	矿岩抗压强度/MPa	矿柱抗拉强度/MPa	露天坑深度/m	节理密度	地下矿采矿方法	露天坑积水
新桥硫铁矿	24	88.1	10.6	176	3	4	2
石人沟铁矿	20	99.44	11.92	105	3	2	3
获各琦铜矿	24	54.08	5.13	144	3	1	4

果如式(9)–(11)所示。

$$(\mu_{1jk})_{7 \times 4} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.38 & 0.62 \\ 0 & 0.10 & 0.90 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.10 \\ 0 & 0.96 & 0.04 & 0 \\ 0 & 0 & 1.00 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.00 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$(\mu_{2jk})_{7 \times 4} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.51 & 0.49 \\ 0 & 0 & 0.06 & 0.94 \\ 0 & 0 & 0.00 & 1.00 \\ 0 & 0 & 0.20 & 0.80 \\ 0 & 0 & 1.00 & 0 \\ 0 & 1.00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.00 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$(\mu_{3jk})_{7 \times 4} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.38 & 0.62 \\ 1.00 & 0 & 0 & 0 \\ 1.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.38 & 0.62 & 0 \\ 0 & 0 & 1.00 & 0 \\ 1.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (11)$$

### 3.1 多指标评价矩阵的计算

采用熵理论计算评价指标的权重,由式(5)–(6)计算可得出新桥硫铁矿  $W_1$ 、石人沟铁矿  $W_2$  和获各琦铜矿  $W_3$  的评价指标的权重分别为

$$W_1 = \{0.0844, 0.1232, 0.1621, 0.1424, 0.1621, 0.1621, 0.1621\}$$

$$W_2 = \{0.0837, 0.1400, 0.1674, 0.1756, 0.1674, 0.1674, 0.1674\}$$

$$W_3 = \{0.0799, 0.1655, 0.1480, 0.1655, 0.1655, 0.1655, 0.1655\}$$

由各矿山的单指标测度矩阵和各指标的权重,根据式(7),可以计算得到每个矿山的多指标未确知测度评价向量,如表4所示。

表4 多指标未确知测度模型评价向量

Table 4 Evaluation vector of multiple indicator unascertained measurement

矿山名称	多指标未确知测度			
	$R_1(I)$	$R_2(II)$	$R_3(III)$	$R_4(IV)$
新桥硫铁矿	0.000	0.3105	0.3130	0.3765
石人沟铁矿	0.000	0.1674	0.4209	0.4117
获各琦铜矿	0.4411	0.0562	0.2876	0.2150

### 3.2 置信度识别

取置信度  $\lambda=0.5$ , 由多指标未确知测度评价向量和置信度评价准则公式(8),可以判别出3个矿山的境界顶柱安全性等级,如表5所示。

工程实际中石人沟铁矿和获各琦铜矿已经完成了露天

表5 未确知测度评价结果

Table 5 Uncertainty measurement evaluation results

矿山	等级	安全与否	实际情况
新桥硫铁矿	III级	安全	
石人沟铁矿	III级	安全	工程状况良好
获各琦铜矿	II级	不安全	已发生坍塌

转地下工作。露天转地下完成之后,石人沟铁矿境界顶柱保存状态良好,评价结果与实际情况相符;获各琦铜矿自2005年进行露天转地下工作以来,到2010年境界顶柱已经发生了坍塌破坏,露天坑坑底塌陷,评价结果与实际情况相符;该评价方法所得的安全等级与实际情况符合较好,因此可以认为采用其进行境界顶柱安全性评价是可信的,新桥硫铁矿境界顶柱的安全等级为III级,这样可以认为新桥硫铁矿露天转地下采用24m的境界顶柱是可以满足安全性要求的。

## 4 结论

本文通过建立境界顶柱未确知测度安全评价模型,分析了多种因素作用下境界顶柱的安全性,得出结论如下:

(1) 对境界顶柱安全性评价进行研究,境界顶柱安全性影响因素众多并存在诸多的不确定性。综合考虑境界顶柱的主要影响因素,将未确知数学理论引入境界顶柱安全性评价,并选取境界顶柱厚度、矿岩的抗压强度、矿岩的抗拉强度、露天坑深度、节理分布、地下矿采矿方法、露天坑积水7项指标建立了境界顶柱安全性未确知测度评价模型。

该模型采用熵理论确定各指标的权重并采用置信度识别准则对安全等级进行分级。可减少人为因素对评价结果的影响,评价结果更为可靠。

(2) 采用该评价模型对国内3座典型的露天转地下矿山的境界顶柱安全性进行评价,由模型所得的评价等级与其中已经完成露天转地下的2座矿山的境界顶柱状况相符,并据此得出了新桥硫铁矿采用的境界顶柱方案是能满足安全生产要求的结论。

(3) 基于未确知测度理论建立的安全评价模型得出的评价结果与工程实际复合较好。由于未确知测度安全评价模型的建立对分级标准的依赖度较高,并且分级标准没有统一的标准,如何解决这个问题还需要进一步研究。

### 参考文献 (References)

[1] 范军富, 宋子岭, 王东. 白音华一号露天煤矿合理帮坡角的确定及边坡稳定性评价[J]. 科技导报, 2011, 29(28): 57–61.  
Fan Junfu, Song Ziling, Wang Dong. *Science and Technology Review*, 2011, 29(28): 57–61.

[2] 宋子岭, 贾兰, 范军, 等. 深凹露天坑回填工艺 [J]. 科技导报, 2012, 30(4): 51–54.  
Song Ziling, Jia Lan, Fan Jun, et al. *Science and Technology Review*, 2012, 30(4): 51–54.

[3] 徐宏亮, 杨天鹏, 朱立凯. 司家营铁矿 III 采场露天转地下境界顶柱合



- 理厚度研究[J]. 中国矿业, 2007, 16(4): 74-76.
- Xu Hongliang, Yang Tianpeng, Zhu Likai. *China Mining Magazine*, 2007, 16(4): 74-76.
- [4] 常兴建, 耿付顺, 赵兴东. 境界矿柱厚度确定方法研究 [J]. 有色矿冶, 2003, 19(5): 7-8.
- Chang Xingjian, Geng Fushun, Zhao Xingdong. *Non-fressous Mining and Metallurgy*, 2003, 19(5): 7-8.
- [5] 汪茂华, 余仁兵. 露天坑底境界矿柱厚度及采场尺寸的数值模拟[J]. 采矿技术, 2009, 9(5): 14-16.
- Wang Maohua, Yu Renbing. *Mining Technology*, 2009, 9(5): 14-16.
- [6] 马天辉, 杨天鹏, 赵兴东, 等. 露天转井下开采境界顶柱参数三维有限元分析木[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2006, 27(4): 450-453.
- Ma Tianhui, Yang Tianpeng, Zhao Xingdong, et al. *Journal of Northeastern University: Natural Science Edition*, 2006, 27(4): 450-453.
- [7] 南世卿, 宋爱东, 张从军. 石人沟铁矿露天转地下开采境界顶柱破坏模式和稳定性的研究[J]. 河北冶金, 2010(7): 8-11.
- Nan Shiqing, Song Aidong, Zhang Congjun. *Hebei Metallurgy*, 2010(7): 8-11.
- [8] 王新民, 丁德强, 段瑜. 灰色关联分析在地下采空区危险度评价中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2006, 2(4): 35-39.
- Wang Xinmin, Ding Deqiang, Duan Yu. *Journal of Safety Science and Technology*, 2006, 2(4): 35-39.
- [9] 蒋卫东, 李夕兵, 胡柳青, 等. 基于灰色定权聚类的采空区上部地表稳定性分析[J]. 矿业工程, 2002, 22(4): 15-17.
- Jiang Weidong, Li Xibing, Hu Liuqing, et al. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2002, 22(4): 15-17.
- [10] 李元辉, 南世卿, 赵兴东, 等. 露天转地下境界顶柱稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 278-283.
- Li Yuanhui, Nan Shiqing, Zhao Xingdong, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(2): 278-283.
- [11] 丁向东, 吴继敏, 李健, 等. 岩爆分类的人工神经网络预测方法[J]. 淮海大学学报: 自然科学版, 2003, 31(4): 424-427.
- Ding Xiangdong, Wu Jimin, Li Jian, et al. *Journal of Hohai University: Natural Science Edition*, 2003, 31(4): 424-427.
- [12] 梁缙, 李志宪, 王海燕. 加油站模糊数学安全评价模型及应用 [J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(8): 106-108.
- Liang Jin, Li Zhixian, Wang Haiyan. *China Safety Science Journal*, 2004, 14(8): 106-108.
- [13] 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.
- [14] 刘开第, 吴和琴, 庞彦军, 等. 不确定性信息数学处理及应用 [J]. 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.
- [15] 曹庆奎, 刘开展, 张博文. 用熵计算客观型指标权重的方法 [J]. 河北建筑科技学院学报, 2000, 17(3): 40-42.
- Cao Qingkui, Liu Kaizhan, Zhang Bowen. *Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology*, 2000, 17(3): 40-42.
- [16] 史修志, 周健, 董蕾, 等. 未确知测度模型在岩爆烈度分级预测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 2720-2725.
- Shi Xiuzhi, Zhou Jian, Dong Lei, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(1): 2720-2725.
- [17] 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.
- [18] 章启忠. 大冶铁矿深凹露天转地下开采的几个安全问题研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2007.
- Zhang Qizhong. Study on some safety problems of the Daye Iron deep open-pit-mine transferring to underground mining [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [19] 乔国刚, 李占金, 杨丹丹, 等. 露天转地下开采覆盖层厚度的影响因素分析[J]. 金属矿山, 2008(4): 34-36.
- Qiao Guogang, Li Zhanjin, Yang Dandan, et al. *Metal Mine*, 2008(4): 34-36.
- [20] 南世卿. 露天转地下境界顶柱稳定性分析及采矿技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2007.
- Nan Shiqing. Investigation on the stability of boundary pillar and mining technology transition Open-pit to underground mine [D]. Shenyang: Northeastern University, 2007.
- [21] 马天辉. 石人沟铁矿露天转地下岩体稳定性分析 [D]. 沈阳: 东北大学, 2003.
- Ma Tianhui. Rockmass stability analysis of Shirengou open-pit mine transferring into underground [D]. Shenyang: Northeastern University, 2003.
- [22] 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.

(责任编辑 朱宇)



## 《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。