

基于未确知测度理论的采空区危险性评价研究

宫凤强^{1,2}, 李夕兵^{1,2}, 董陇军^{1,2}, 刘希灵^{1,2}

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学 深部金属矿产开发与灾害控制湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要: 基于未确知测度理论, 建立矿山采空区的危险性等级评价和排序模型。从地质条件和工程状况出发, 考虑影响采空区稳定性的 14 项因素, 根据实测数据建立各影响因素的未确知测度函数。该模型针对采空区危险性评价中的诸多不确定性影响因素, 根据实际情况, 分别对其进行定性、定量分析, 并利用熵计算各影响因素的指标权重, 依照置信度识别准则进行等级判定, 最后得出采空区危险性的评价结果。评价方法能解决采空区危险性评价中诸多因素不确定性问题, 还可以按危险程度进行排序。将该方法应用于广东省大宝山矿 15 个采空区的危险性评价。研究表明, 该方法科学合理, 意义明确, 可以在实际工程中进行推广应用。

关键词: 采矿工程; 采空区; 未确知测度; 置信度识别准则; 危险性评价

中图分类号: TD 327

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)02 - 323 - 08

UNDERGROUND GOAF RISK EVALUATION BASED ON UNCERTAINTY MEASUREMENT THEORY

GONG Fengqiang^{1,2}, LI Xibing^{1,2}, DONG Longjun^{1,2}, LIU Xiling^{1,2}

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. Hunan Key Laboratory of Resources Exploration and Hazard Control for Deep Metal Mines, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: Based on the uncertainty measurement theory, a risk-evaluating and order-arranging model of mining underground goaf was established. Considering the geologic condition and engineering status of underground goaf, 14 factors that influence the stability of underground goaf were taken into account; and uncertainty measurement function was obtained based on the in-situ data. The uncertainty problems in risk evaluation were solved by qualitative analysis and quantitative analysis respectively. Entropy theory was used to calculate the index weight of factors; and credible degree recognition criteria were established according to the theory uncertainty measurement. The results of risk evaluation can be obtained with the credible degree criteria. This method can also arrange the order of risk degree. Furthermore, this model was employed to evaluate 15 risk underground goafs in Dabaoshan mine. Compared with the results of fuzzy synthetic evaluation method, the results show that uncertainty measurement method is reasonable and can be applied to the actual engineering.

Key words: mining engineering; underground goaf; uncertainty measurement; credible degree recognition criterion; risk evaluation

1 引言

人类对矿产资源的获取大多是通过地下开采方

式获得的, 在开采过程中应用房柱法、全面法及留矿法等空场类方法采矿, 通常会形成大量的地下采空区^[1, 2]。特别是自 20 世纪 80 年代以来, 我国矿

收稿日期: 2007 - 06 - 27; **修回日期:** 2007 - 09 - 14

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50490274); 高校博士点基金项目(20060533011); 中南大学研究生学位论文创新选题资助项目(1343 - 77238)

作者简介: 宫凤强(1979 -), 男, 2003 年毕业于中南大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事矿山、岩土工程灾害预测、稳定性及可靠性分析方面的研究工作。E-mail: fengqiang@126.com

业开采秩序较为混乱,非法、无规划的乱采、滥挖在一些国有矿山周边留下了大量的不明采空区。目前,采空区已经成为影响矿山安全生产最主要的危害源之一,也是安全生产中的两大隐患之一^[3,4]。

目前我国大多数矿山,譬如广西大厂矿区、甘肃厂坝铅锌矿、铜陵狮子山铜矿、河南栾川钼矿、云南兰坪铅锌矿和广东大宝山矿等许多矿山都存在大量的采空区,严重影响了矿山的安全生产。地下采空区对工程的危害是显著的,主要体现在两个方面^[5]:一个危害表现在采空区顶板大面积冒落,造成地表沉陷和开裂,破坏地面环境和影响露天作业;如2004年5月20日峰城石膏矿区发生顶板塌陷事故。矿区塌陷的面积 $14.47 \times 10^4 \text{ m}^2$ 、总质量超过 $230 \times 10^4 \text{ t}$,冒落的体积约 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2004年11月6日,河北邢台尚汪庄康立石膏矿发生坍塌事故,造成太行、林旺两矿生活区部分房屋倒塌,33人死亡、4人失踪,直接经济损失达744万元。另一个危害是矿山开采过程中,采空区围岩受爆破震动影响导致岩体裂隙发育,甚至贯通地表或连通老窿积水,发生突水事故,从而淹没坑道和工作面,造成损失。2001年7月17日凌晨,广西南丹拉甲坡矿发生特大透水事故,酿成震惊全国的“7·17”矿难所属,导致这2个矿山同时被淹,死亡81人,直接经济损失达8000万元。此外,采空区引发的工程地质问题,对矿区生产、城市、交通、管线、水体运动会产生严重影响,对农村农耕地的破坏也不容忽视。其中有代表性的金属矿山有^[4]:凡口铅锌矿因疏干产生地表塌陷1982个,范围达 675 km^2 ,受损农田约 66.7 km^2 ,建筑物搬迁 7 km^2 ;山东莱州马塘金矿因开采导致地表严重塌陷,致使莱州~招远的国家级公路遭受严重的塌陷破坏而中断交通,民房被毁;金川集团有限公司二矿区虽然采用了充填法开采,但其地表已出现明显的张裂缝和岩层错动痕迹,这表明采场上覆岩层移动已发展到地表,并随着开采深度的增加有不断扩大的趋势。因此,采空区是目前矿山尤其是非煤矿山安全生产中的非常值得重视的一个问题。

鉴于此,采空区稳定性的安全评价显得尤为重要。国内外很多学者在此方面做出了卓有成效的贡献,主要包括对地下采空区进行精确探测技术的研究^[6,7]和采空区稳定性安全评判研究等。在采空区危险性评价方面,主要有综合评判法^[8]、灰色定权聚类法^[9]、灰色关联分析方法^[10]及神经网络方法^[11]等。虽然目前发展出很多方法,然而,采空区危险

性评价的难点在于许多因素的不确定性和隐蔽性,如何将这些不确定的信息考虑在内并进行分析,是值得研究的一个重要问题。在这方面,未确知数学理论提供了一个比较好的途径。

未确知信息及其数学处理理论最早是由王光远^[12]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。在此基础上,刘开第等^[13]建立了未确知数学理论,并将该理论运用到社会科学和自然科学中。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^[14~17]。本文借鉴未确知测度评价模型的理论 and 思想,将未确知数学理论运用到采空区危险性评价问题中,可以解决采空区危险性评价系统中诸多因素不确定性问题,还能对其进行定量分析。本文针对采空区的实际情况,首先基于未确知测度理论构造了未确知测度模型,计算了各评价指标的未确知测度值;然后利用信息熵理论确定了采空区危险性影响因素的权重;最后用置信度准则进行判别评价。利用该模型对广东省大宝山矿区15个采空区进行危险性评价,并与模糊数学评价结果对比,研究结果表明该方法较为理想和实用,为采空区危险性的评价提供了一种新的思路。

2 未确知测度计算理论

设某评价对象 R 有 n 个,则评价对象空间 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ 。对于每个评价的对象 $R_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 有 m 个单项评价指标空间,即 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ 。则 R_i 可表示为 m 维向量 $R_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$,其中, x_{ij} 表示研究对象 R_i 关于评价指标 X_j 的测量值。对每个子项 $x_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$,假设有 p 个评价等级 $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ 。

评价空间记为 U ,则有 $U = \{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ 。设 $C_k (k = 1, 2, \dots, p)$ 为第 k 级评价等级,且 k 级比 $k+1$ 级危险等级“高”,记作 $C_k > C_{k+1}$ 。若满足 $C_1 > C_2 > C_3 > \dots > C_k$,称 $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ 是评价空间 U 的一个有序分割类^[14]。

2.1 单指标测度

若 $\mu_{ik} = \mu(x_{ij} \in C_k)$ 表示测量值 x_{ij} 属于第 k 个评价等级 C_k 的程度,且要求满足:

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

$$\mu(x_{ij} \in U) = 1 \quad (2)$$

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

式(2)称为“归一性”, 式(3)称为“可加性”。满足式(1)~(3)的 μ 称为未确知测度(uncertainty measure), 简称测度^[14]。

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

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

2.2 指标权重的确定

在此, 需要确定各项指标的权重。设 w_j 表示测量指标 X_j 与其他指标相比具有的相对重要程度, 要求 w_j 满足: $0 \leq w_j \leq 1$, 且 $\sum_{j=1}^m w_j = 1$, 称 w_j 为 X_j 的权重, $w = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$ 称为指标权重向量。可利用熵确定权重^[17], 即

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

$$w_j = v_j / \sum_{i=1}^n v_i \quad (6)$$

因为单指标测度评价矩阵式(4)是已知的, 所以可以通过式(5), (6)可求得 w_j 。

2.3 多指标综合测度评价向量

令 $\mu_{ik} = \mu(R_i \in C_k)$ 为评价样本 R_i 属于第 k 个评价类 C_k 的程度, 则有

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

显然有 $0 \leq \mu_{ik} \leq 1$ 以及 $\sum_{k=1}^p \mu_{ik} = 1$, 所以式(7)是

未确知测度, 故称 $\{\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{ip}\}$ 为 R_i 的多指标综合测度评价向量^[14]。

2.4 置信度识别准则

为了对评价对象作出最后的评价结果, 引入置信度识别准则: 设 λ 为置信度 ($\lambda \geq 0.5$)^[14], 若 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$, 且令

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

则认为评价样本 R_i 属于第 k_0 个评价类 C_{k_0} 。

2.5 排序

除了要判别 R_i 属于那个评价等级外, 有时要求对 R_i 的危险性重要程度排出顺序^[14]。若 $C_1 >$

$C_2 > \dots > C_p$, 令 C_l 的分值为 I_l , 则 $I_1 > I_{l+1}$, 且有

$$q_{R_i} = \sum_{l=1}^p I_l \mu_{il} \quad (9)$$

式中: q_{R_i} 为评价因素 R_i 的未确知重要度, 称 $q = \{q_{R_1}, q_{R_2}, \dots, q_{R_n}\}$ 为未确知重要度向量, 可按 q_{R_i} 的大小对 R_i 的危险性重要度排序。

3 采空区危险性评价指标体系

根据有关研究^[18]的采空区危险性指标体系, 选取 14 项因素作为评价影响因子, 即岩体结构、地质构造、岩石质量指标、地下水、地下水体、周围的开采影响、相邻空区情况、跨度、面积、高度、矿柱尺寸和布置、埋藏深度、采空区的规格形状(跨度/高度的比值)和工程布置(分别用 $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}$ 表示), 其中对岩体结构、地质构造、地下水、地下水体、周围的开采影响、相邻空区情况、矿柱尺寸和布置、采空区的规格形状(跨度/高度的比值)、工程布置用半定量化的方法进行取值, 其分级标准及赋值情况见表 1。对岩石质量指标、跨度、面积、高度、埋藏深度用实测值进行评价, 其分级标准见表 2。对各评价指标进行分级及取值, 评判集为 $\{C_1, C_2, C_3, C_4\}$, 即 I, II, III, IV 级, 分别表示危险性极高、危险性较高、危险性一般和危险性较低。

4 工程实例应用

广东省大宝山矿位于粤桂海西拗陷区的东侧, 曲江盆地东南缘, 大东山—贵东 EW 向构造带与北东向北江断裂带的复合处, 属于多金属矿床。该矿床类型按成矿地质条件和矿床产出空间位置, 可分为上部风化淋滤型褐铁矿床、中部火山沉积—热液改造型层状菱铁矿床、下部火山沉—热改造型层状铜铅锌多金属矿床和西部斑岩型钼矿床。其下辖的铜业分公司井下由于采用空场法开采, 特别是民采泛滥。因而在现开采区段, 即 11~57 线沿走向 2 000 m 地段, 形成了大量的采空区, 造成井下地压活动频繁, 特征明显, 如矿柱开裂破坏、冒顶, 已经多次形成大的冒落和地压活动, 对地表、露天边坡、露天铁矿开采、井下和生产系统构成严重的破坏和威胁, 并多次导致采空区灾害事故的发生。

现有资料分析统计出采空区的数量为 254 个, 其形态大多呈不规则状态, 体积较小的为 400 m³,

表 1 采空区危险性评价的定性指标分级与赋值
Table 1 Classification criterion of qualitative indexes in underground goaf risk evaluation

Table with 10 columns: 影响程度分级, 赋值, 岩体结构(X1), 地质构造(X2), 地下可见水(X4), 地下水体对围岩的影响(X5), 周围的开采影响(X6), 相邻空区情况(X7), 矿柱尺寸和布置(X11), 采空区规格形状(X13), 工程布置(X14). Rows include I级(C1), II级(C2), II级(C3), and IV级(C4) with detailed descriptions of rock structure, geological conditions, and risk levels.

注: λ为跨高比。

表 2 采空区危险性评价的定量指标分级标准
Table 2 Classification criterion of quantitative indexes in underground goaf risk evaluation

Table with 6 columns: 影响程度分级, 岩石质量指标(X3)/%, 跨度(X8)/m, 面积(X9)/m², 高度(X10)/m, 埋藏深度(X12)/m. Rows include I级(C1), II级(C2), II级(C3), and IV级(C4) with numerical ranges for each indicator.

体积较大的则达 10×10⁴ m³, 个别采空区的体积达 10×10⁴ m³ 以上, 高度为 100 m 以上; 全矿至 2003 年 6 月以前的采空区总体积为: 180×10⁴ m³ 以上。有多个空区已经出现矿柱片帮、顶板冒落现象, 特别是民采遗弃的采空区周边矿柱出现明显的开裂破坏特征, 局部地段采空区冒落大块重达数十吨。

结合大宝山矿区的水文地质条件、露天与地下联合开采的现状、环境因素以及采空区自身的结构参数, 本文共选择了 15 个采空区, 分别对各影响因子进行取值[18]。作为采空区灾害危险性的评价对象, 各采空区基本情况见表 3。

4.1 构建单指标测度函数

根据单指标测度函数的定义和表 1, 2 构建单指标测度函数以便求得各评价指标的测度值。其中岩石质量指标、跨度、面积、高度、埋藏深度的单指标测度函数分别见图 1~5。岩体结构、地质构造、

地下水体、周围的开采影响、相邻空区情况、矿柱尺寸和布置、采空区的规格形状(跨度/高度的比值)、工程布置的单指标测度函数见图 6。

由表 3 中各因素的取值, 根据以上单指标测度函数(见图 1~6), 可以求得 15 个采空区的单指标测度评价矩阵。以 R01 采空区为例, 根据表 3 中 14 个影响因素的取值, 分别代入图 1~6 的单指标测度函数中, 计算可知 R01 的单指标评价矩阵为

(μ1jk)14x4 = [1.00 0.00 0.00 0.00; 0.00 0.62 0.38 0.00; 1.00 0.00 0.00 0.00; 0.00 0.09 0.91 0.00; 0.00 0.73 0.27 0.00; 0.00 1.00 0.00 0.00; 0.00 0.00 0.00 1.00; 0.00 0.00 1.00 0.00; 0.00 0.00 1.00 0.00; 1.00 0.00 0.00 0.00; 1.00 0.00 0.00 0.00; 1.00 0.00 0.00 0.00; 0.00 0.00 1.00 0.00; 0.00 0.00 1.00 0.00]

表 3 采空区危险性评价指标调查统计表
Table 3 Estimation and measured data of risk evaluation indexes of underground goaf

采空区 编号	采空区危险性的评价指标													
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}
R_{01}	2	4	38	3	3	1	1	85	5 190	15.0	1	260	3	3
R_{02}	3	3	56	3	3	1	1	60	1 230	8.0	2	260	3	4
R_{03}	2	2	35	3	3	1	1	62	2 560	14.5	1	290	2	3
R_{04}	2	3	48	3	3	1	1	73	1 740	22.0	1	280	1	2
R_{05}	2	3	43	3	3	1	1	60	1 920	16.5	1	280	2	3
R_{06}	2	2	47	3	3	1	1	160	6 890	26.3	1	305	1	2
R_{07}	3	4	55	4	4	4	4	26	2 870	15.8	3	305	4	4
R_{08}	3	4	57	3	3	1	1	96	2 260	21.0	2	335	3	4
R_{09}	4	4	67	3	3	4	4	60	1 200	10.0	4	335	4	4
R_{10}	4	3	53	2	2	1	1	85	3 970	60.0	1	240	3	3
R_{11}	4	3	59	4	4	4	4	40	2 260	15.0	4	305	3	4
R_{12}	4	4	62	3	3	4	4	35	1 450	13.0	4	290	4	4
R_{13}	4	4	52	3	3	2	2	35	2 590	6.0	4	201	4	4
R_{14}	4	4	55	4	4	2	2	65	2 430	12.0	4	208	4	4
R_{15}	4	4	54	4	4	2	2	68	1 800	10.0	4	208	3	4

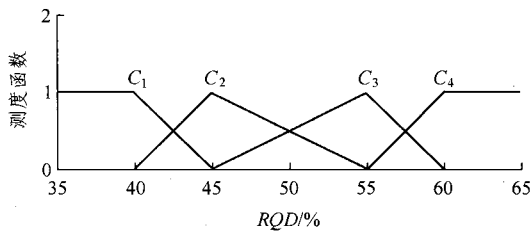


图 1 岩石质量指标 RQD 单指标测度函数

Fig.1 Uncertainty measurement function of rock RQD

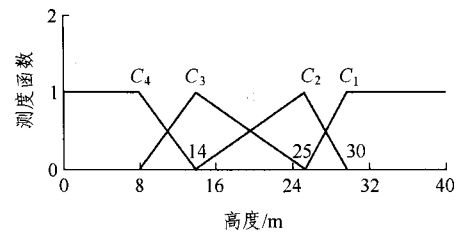


图 4 采空区高度单指标测度函数

Fig.4 Uncertainty measurement function of underground goaf height

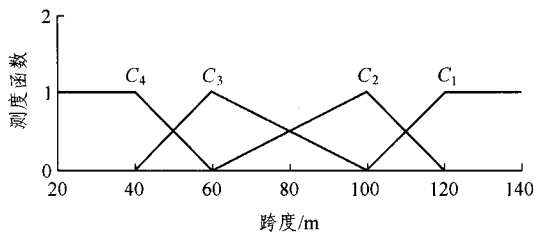


图 2 采空区跨度单指标测度函数

Fig.2 Uncertainty measurement function of underground goaf span

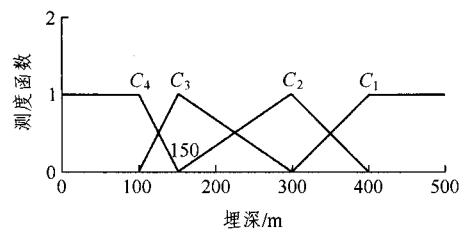


图 5 采空区埋藏深度单指标测度函数

Fig.5 Uncertainty measurement function of underground goaf depth

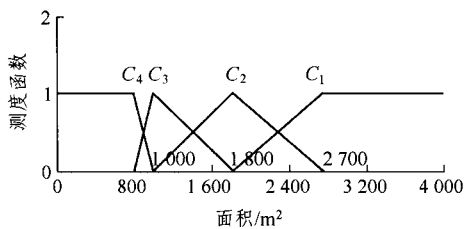


图 3 采空区面积单指标测度函数

Fig.3 Uncertainty measurement function of underground goaf area

4.2 计算多指标测度评价矩阵

用式(1)~(6)确定各评价指标权重, R_{01} 的评价指标权重: $\{w_1, w_2, \dots, w_n\} = \{0.077\ 20, 0.040\ 63, 0.077\ 20, 0.060\ 76, 0.045\ 25, 0.077\ 20, 0.077\ 20, 0.077\ 20, 0.077\ 20, 0.077\ 20, 0.077\ 20, 0.077\ 20, 0.077\ 20\}$, 根据单指标矩阵和式(7)求得 R_{01} 的多指标综合测度评价向量: $\{0.389, 0.142, 0.394, 0.078\}$ 。

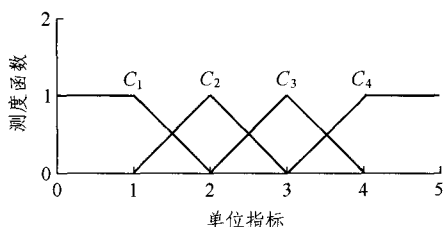


图6 岩体结构、地质构造、地下水、地下水体、周围的开采影响、相邻空区情况、矿柱尺寸和布置、采空区的规格形状、工程布置的单指标测度函数

Fig.6 Uncertainty measurement function of rock structure, geological structure, groundwater, groundwater body, mining induced influence, condition of close underground goaf, condition of position and size of mining pillar, engineering position

4.3 置信度识别

取置信度 $\lambda=0.5$ ，由多指标综合测度评价向量式(7)和置信度评价准则式(8)，从小到大，且 $k_0 = 0.531 > \lambda$ ，即 R_{01} 的危险性等级为 II 级；从大到小 $k_0 = 0.614 > \lambda$ ， R_{01} 的危险性等级也为 II 级。由此可见，两次判别的结果一致，可以判定采空区 R_{01} 的危险性等级为 II 级，即危险等级属危险性较高。同理，对 $R_{02} \sim R_{15}$ 进行评价，将评价结果列入表 4，并与模糊数学的综合评价结果^[18]进行比较。

4.4 评价结果分析

从表 4 可以看出，其中 10 个采空区未确知测度的评价结果和模糊数学评价结果完全相同，另外有 5 个采空区判别存在不一致。通过分析，认为未确知测度的评价结果更加合理有效，具体体现在：模糊数学评价结果采用的是最大隶属度识别准则。按最大隶属度识别准则， R_{01} 可判属 I 级，但这显然不合理(见表 5)。因为 R_{01} 属于 I 级的隶属度仅为 0.374，和 III 级的隶属度 0.330 相差很小，为作比较，把置信度识别准则引入到模糊数学评价方法中。设 λ 为置信度，本文取 $\lambda = 0.5$ ，从大到小和从小到大的评价结果相同，均为 II 级，所以将 R_{01} 判为 II 级，与未确知测度评价结果完全相同。同理， R_{03} 有属于 I 级的隶属度为 0.380，与属于 II 级的隶属度 0.323 很接近，判为 I 级显然不合理，为此，引入置信度识别准则， $\lambda = 0.5$ ，判为 II 级；同理 R_{04} 判为 II 级， R_{01} 判为 II 级， R_{06} 判为 II 级， R_{10} 判为 II 级。

从结果可以看出，在模糊数学中引入置信度识别准则后的评价结果与未确知测度结果完全吻合，由此可见未确知测度的评价结果更加科学合理。并且在权重确定时采用信息熵理论，减少了人为因素影响，权重更加客观真实，这是模糊综合评判无法比拟的。

表 4 未确知测度模型评价结果与模糊数学判别结果比较

Table 4 Comparison of the results of uncertainty measurement evaluation and fuzzy synthetic evaluation

采空区 编号	综合未确知测度				本文方法 判别结果	模糊数学法 判别结果
	C_1	C_2	C_3	C_4		
R_{01}	0.389	0.142	0.394	0.078	II 级	I 级
R_{02}	0.156	0.124	0.475	0.244	III 级	III 级
R_{03}	0.346	0.294	0.356	0.003	II 级	I 级
R_{04}	0.327	0.358	0.314	0.000	II 级	III 级
R_{05}	0.262	0.295	0.443	0.000	II 级	III 级
R_{06}	0.471	0.366	0.162	0.000	II 级	I 级
R_{07}	0.077	0.068	0.264	0.591	IV 级	IV 级
R_{08}	0.235	0.209	0.370	0.186	III 级	III 级
R_{09}	0.094	0.063	0.263	0.581	IV 级	IV 级
R_{10}	0.397	0.223	0.301	0.079	II 级	I 级
R_{11}	0.023	0.088	0.222	0.666	IV 级	IV 级
R_{12}	0.000	0.075	0.219	0.706	IV 级	IV 级
R_{13}	0.050	0.190	0.214	0.545	IV 级	IV 级
R_{14}	0.034	0.216	0.205	0.632	IV 级	IV 级
R_{15}	0.080	0.193	0.216	0.510	IV 级	IV 级

表 5 部分样本的模糊数学判别结果

Table 5 Results with the fuzzy synthetic evaluation for part samples

采空区编号	I 级	II 级	III 级	IV 级
R_{01}	0.374	0.173	0.330	0.123
R_{03}	0.380	0.323	0.297	0.000
R_{04}	0.361	0.277	0.362	0.000
R_{05}	0.339	0.250	0.411	0.000
R_{06}	0.425	0.390	0.185	0.000
R_{10}	0.358	0.276	0.286	0.080

4.5 危险性重要度排序

根据式(9), 由于 $C_1 > C_2 > C_3 > C_4$, 令 $C_1 = 4$, $C_2 = 3$, $C_3 = 2$, $C_4 = 1$ 计算其相对重要度, 则有 $q = \{q_{R_{01}}, q_{R_{02}}, \dots, q_{R_{15}}\} = \{1.369, 1.469, 1.631, 1.669, 1.745, 1.829, 1.843, 2.192, 2.492, 2.820, 0.318, 2.938, 2.984, 3.013, 3.309\}$ 。

对 15 个采空区的危险性按重要度排序, 则采空区危险性程度从大到小依次为 R_{06} , R_{04} , R_{03} , R_{10} , R_{01} , R_{05} , R_{08} , R_{02} , R_{15} , R_{14} , R_{13} , R_{09} , R_{07} , R_{11} , R_{12} 。实际上, 由于同时处理大量的采空区在时间和人力上等都会存在问题, 现在根据危险性程度顺序, 首先处理危险性程度高的, 这样可以在不影响开采的基础上科学合理的处理采空区, 为生产和采空区治理提供科学的指导。

按照危险性程度大小, 其具体评价结果为:

(1) 属于 II 级危险源, 即危险度较高的采空区分别是 570 中段的 R_{06} 、591 中段的 R_{04} , R_{03} 及 630 中段的 R_{10} 和 610 中段的 R_{01} 及 591 中段的 R_{05} , 共计 6 个。

(2) 属于 III 级危险源, 即危险度一般的采空区分别是 542 中段的 R_{08} 和 610 中段的 R_{02} , 合计 2 个。

(3) 其余的属于 IV 级危险源, 即危险度较低的采空区分别是 673 中段的 R_{15} , R_{14} 以及 673 中段的 R_{13} , 542 中段的 R_{09} 和 570 中段的 R_{07} , R_{11} 及 591 中段的 R_{12} , 共计 7 个。

5 结 论

运用未确知测度评价模型对采空区灾害的危险性进行了评价与划分。选取影响采空区稳定性的 14

项因素, 根据实测数据建立各影响因素的未确知测度函数。在评价过程中, 利用熵计算各影响因素的指标权重, 减少了主观因素的影响。最后依照置信度识别准则进行等级判定, 得出采空区危险性的评价结果。结合大宝山矿采空区的现场数据, 利用未确知测度评价模型对 15 个采空区进行了分析。

研究表明, 未确知测度评价模型更加科学合理, 不仅确定了危险源点及其危险度等级, 还可以按危险性重要程度排序, 以保证确保危险性高的先治理。本文方法为矿山安全生产和采空区治理提供了一条新思路, 具有重要的理论和现实意义。

参考文献(References):

- [1] 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 91 - 99.(ZHOU Hongwei, XIE Heping, ZUO Jianping. Developments in researches on mechanical behaviours of rocks under the condition of high ground pressure in depths[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 91 - 99.(in Chinese))
- [2] 冯长根, 李俊平, 于文远, 等. 东桐峪金矿空场处理机制研究[J]. 黄金, 2002, 23(10): 11 - 15.(FENG Changgen, LI Junping, YU Wenyan, et al. Mechanism study on abandoned stope disposal in Dongtongyu gold mine[J]. Gold, 2002, 23(10): 11 - 15.(in Chinese))
- [3] 古德生, 李夕兵. 现代金属矿床开采科学技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.(GU Desheng, LI Xibing. Modern mining science and technology for metal mineral resources[M]. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 2006.(in Chinese))
- [4] 国家安全生产监督管理总局. 国家安全生产科技发展规划——非煤矿山领域研究报告(2004~2010)[R]. 北京: 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局, 2003.(State Administration of Work Safety. State technological development programming of work safety — non-coal mine domain research bulletin(2004 - 2010)[R]. Beijing: State Administration of Work Safety, State Administration of Coal Mine Safety, 2003.(in Chinese))
- [5] 李夕兵, 李地元, 赵国彦, 等. 金属矿地下采空区探测、处理与安全评判[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 24 - 29.(LI Xibing, LI Diyu, ZHAO Guoyan, et al. Detecting, disposal and safety evaluation of the underground goaf in metal mines[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2006, 23(1): 24 - 29.(in Chinese))
- [6] 童立元, 刘松玉, 邱 钰, 等. 高速公路下伏采空区问题国内外研究现状及进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1 198 - 1 202.(TONG Liyuan, LIU Songyu, QIU Yu, et al. Current research

- state of problems associated with mined-out regions under expressway and future development[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1 198 - 1 202.(in Chinese))
- [7] 李夕兵, 赵国彦, 周子龙, 等. 河南洛钼集团三道庄露天矿采空区综合治理技术研究[R]. 长沙: 中南大学, 2005.(LI Xibing, ZHAO Guoyan, ZHOU Zilong, et al. Research of integrated controlling technology of underground mined-out areas in Sandaozhuang mine of China Molybdenum Co., Ltd.[R]. Changsha: Central South University, 2005.(in Chinese))
- [8] 张长敏, 董贤哲, 祁丽华, 等. 采空区地面塌陷危险性两级模糊综合评判[J]. 地球与环境, 2005, 33(增): 99 - 103.(ZHANG Changmin, DONG Xianzhe, QI Lihua, et al. Two-stage fuzzy comprehensive evaluation on the risk degree of ground collapse in Mencheng town[J]. Earth and Environment, 2005, 33(Supp.): 99 - 103.(in Chinese))
- [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]. 矿冶工程, 2002, 22(4): 15 - 17.(JIANG Weidong, LI Xibing, HU Liuqing, et al. Stability analysis of ground above excavated area based on grey fixed weight cluster[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2002, 22(4): 15 - 17.(in Chinese))
- [10] 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. Applications of the grey relation analysis to the evaluation of the risk degree of the underground mined-out stopes[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2006, 2(4): 35 - 39.(in Chinese))
- [11] 慎乃齐, 杨建伟, 郑惜平. 基于神经网络的采空塌陷预测[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(3): 42 - 43.(SHEN Naiqi, YANG Jianwei, ZHENG Xiping. Prediction of mining collapse based on neural network[J]. Coal Geology and Exploration, 2001, 29(3): 42 - 43.(in Chinese))
- [12] 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. Uncertainty information and its mathematical treatment[J]. Journal of Harbin Architecture and Engineering Institute, 1990, 23(4): 52 - 58.(in Chinese))
- [13] 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.(in Chinese))
- [14] 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. The uncertainty measurement evaluation on a city's environmental quality[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 1999, 19(12): 52 - 58.(in Chinese))
- [15] 刘开第, 吴和琴, 王念鹏, 等. 未确知数学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997.(LIU Kaidi, WU Heqin, WANG Nianpeng, et al. Uncertainty mathematics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1997.(in Chinese))
- [16] 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.(in Chinese))
- [17] 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. Calculation method of objective index weight by entropy[J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 2000, 17(3): 40 - 42.(in Chinese))
- [18] 长沙拓金科技发展有限公司. 大宝山井下安全现状综合评估研究报告[R]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 2005.(Science and Technology Developmental Limited Company of Changsha Tuojin. Study on current safety synthetic evaluation situation of underground in Dabaoshan mine[R]. Changsha: School of Resources and Safety Engineering, Central South University, 2005.(in Chinese))