

doi : 10. 3969/j. issn. 1005 - 3026. 2016. 08. 024

ITOPSIS 与 PSF 耦合的采空区稳定性综合辨析

贾楠,吴超,罗周全,谢承煜
(中南大学资源与安全工程学院,湖南长沙410083)

摘 要:为提高地下金属矿采空区辨析的客观性,提出 ITOPSIS 及 PSF 耦合的综合辨析方法.首先引入 TOPSIS 方法并加以改进,形成适用于整体辨析的改进的 TOPSIS(ITOPSIS)模型;①引入区间值直觉模糊集(IVIFS)以提高定性属性量化描述的客观性;②改进相对贴近度公式,避免了不可区分现象;③针对引发逆序问题的两个因素分别提出绝对理想解及 IFAHP 定权;④构建了采空区整体稳定性 ITOPSIS 等级量化区间,并将 ITOPSIS 运用于某金属矿山.然后,将基于点安全系数(PSF)的数值分析运用于 2[#] 4[#]采空区局部稳定性分析,由 PSF 曲线具象地洞悉采空区局部稳定状态.研究结果为更好地综合分析采空区稳定性提供思路.

关 键 词:采空区;稳定性;综合辨析;改进 TOPSIS;区间值直觉模糊集;点安全系数

中图分类号: X 936 文献标志码: A 文章编号: 1005 - 3026(2016)08 - 1182 - 06

Comprehensive Discrimination on Mined-out Area Through ITOPSIS Coupled with PSF

JIA Nan , WU Chao , LUO Zhou-quan , XIE Cheng-yu
(School of Resources and Safety Engineering , Central South University , Changsha 410083 , China. Corresponding author : JIA Nan , E-mail : jianan1989@ csu. edu. cn)

Abstract : A synthetic discrimination from global to local through improved TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution , TOPSIS) coupled with point safety factors (PSF) was proposed to enhance the objective of goaf stability analysis. Firstly , the TOPSIS method was introduced and improved for global stability analysis. The improved TOPSIS (ITOPSIS) has the following merits : ① Quantitative description objectiveness of qualitative indexes were enhanced through interval-valued intuitionistic fuzzy sets(IVIFS) ; ② Relative closeness formula was improved to avoid the indiscernibility of TOPSIS ; ③ Absolute ideal point and improved fuzzy analytic hierarchy process objective (IFAHP) were used to avoid the reverse phenomenon caused by the change of ideal point and weights respectively ; ④ Stable grade division was realized and ITOPSIS was applied on 10 groups mined-out area samples in a certain mine. Thus , PSF was used on 2[#] 4[#] goaf for local stability discrimination and local stability state can be reflected through PSF graph. The results provide a better comprehensive approach to goaf stability analysis globally and locally.

Key words : mined-out area ; stability ; comprehensive discrimination ; ITOPSIS ; interval-valued intuitionistic fuzzy set ; point safety factor

在浅埋资源接近枯竭的事实下,深部矿产资源的
安全开发与利用成为热点.开采产生采空区
失稳带来的种种灾害^[1]是危害人员及生产安全
的重大危险源.因此,综合辨析采空区的稳定性是

安全生产的关键.随着国内外学者对于采空区领
域研究的不断深入,许多方法纷纷应用于采空区,
如安全系数、神经网络、FOA、寻影追踪、物元理论
等,但多数方法并不具有很好的综合分析能力.

收稿日期: 2015 - 03 - 03
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274250);“ 十二五 ”国家科技支撑计划项目(2012BAK09B02 - 05);中央高校基本科研
业务费专项资金资助项目(2013zzts057).
作者简介: 贾楠(1987 -)女,黑龙江穆棱人,中南大学博士研究生;吴超(1957 -)男,广东揭阳人,中南大学教授,博士生
导师.

因此,本文有效耦合理想点法(technique for order preference by similarity to ideal solution , TOPSIS)及点安全系数方法(point safety factor , PSF) ,提出从整体到局部的采空区稳定性综合辨析概念.在采空区整体稳定性分析阶段,将稳定性辨析属性指标按定性与定量来划分研究,为提高定性指标量化描述的客观性,引入区间值直觉模糊集(interval-valued intuitionistic fuzzy set , IVIFS) ,并依据判别分析理论,引进理想点法^[2-4] ,对其进行针对采空区整体稳定性辨析应用的改进,形成了思路清晰、计算简单的改进 TOPSIS(improved TOPSIS , ITOPSIS)模型.在局部稳定性分析阶段,以点安全系数为基础的数值运算对采空区局部稳定性进行分析,使采空区局部安全状态以具象的曲线表示,并进一步验证了 ITOPSIS 准确性,从而形成了以 ITOPSIS 及 PSF 耦合下的从整体到局部的地下采空区稳定性综合辨析模型.

1 TOPSIS 应用缺陷及改进分析

1.1 应用缺陷及原因分析

TOPSIS 通过研究对象与正理想解 PIS 和负理想解 NIS 的相对距离来评价其优劣状态^[2-4].该方法在普遍应用及具体到采空区应用中存在如下缺陷:

1) 定性指标量化描述客观性低.
传统的定性属性量化描述多用专家打分法,判断结果涵盖强烈个人倾向,包含大量不确定和模糊信息,误差大,主观性强.

2) 不可区分性.
有两种情形的不可区分,可用公式分别表述.
①辨析对象到 PIS 及 NIS 距离相等,不可区分.

$$T_1 = \frac{D_1^-}{D_1^+ + D_1^-} = T_2 = \frac{D_2^-}{D_2^+ + D_2^-} = T_3 = \frac{D_3^-}{D_3^+ + D_3^-} = \dots = \frac{D_n^-}{D_n^+ + D_n^-} = \frac{1}{2} \quad (1)$$

式中 D^+ 为辨析对象与 PIS 距离; D^- 为辨析对象与 NIS 距离; T 为相对贴近度.

②无数“不可区分对”情形.

$$T_s = \frac{D_s^-}{D_s^+ + D_s^-} = T_T = \frac{D_T^-}{D_T^+ + D_T^-} \quad (2)$$

式中下标 S, T 标记两个不可区分的研究对象.

3) 逆序现象.
所谓逆序,是当辨析对象数量改变后导致辨

析结果颠倒的现象.原因分析:①理想解的改变;②指标权重改变.

4) 定量等级划分的应用缺陷.

TOPSIS 是对不同个体优劣排序的方法,因而无法对采空区整体稳定状态进行定量的等级划分.

1.2 采空区整体稳定性辨析 TOPSIS 改进

1) 引入 IVIFS 增加定性指标量化描述客观性^[5-6].

定义 1 对于非空给定论域 X , 任意 $x \in X$ 集合

$$A = \{ x, u_A(x), \nu_A(x) \mid x \in X \}, \quad (3)$$

有 $u_A(x) = [u_A^L(x), u_A^U(x)]$, $\nu_A(x) = [v_A^L(x), v_A^U(x)]$ 均属于区间 $[0, 1]$, 并有

$$u_A^U(x) + v_A^U(x) \leq 1, x \in X. \quad (4)$$

迟疑度函数 $\pi_A(x)$ 为

$$\pi_A(x) = [1 - u_A^U(x) - v_A^U(x), 1 - u_A^L(x) - v_A^L(x)] x \in X. \quad (5)$$

IVIFS 又可简洁表示为

$$A = [(a, b), (c, d)]. \quad (6)$$

其中 $[a, b] \subset [0, 1]$, $[c, d] \subset [0, 1]$, $b + d \leq 1$.

IVIFS 通过隶属度、非隶属度及迟疑度很好地描述了对象属于某一范围的可能性和迟疑程度,对定性指标有更全面具象的描述.

2) IVIFS 与实数共存下 TOPSIS 应用实现.

由于 IVIFS 的引入,运用打分函数保证了辨析体系中实数和 IVIFS 共同存在下实现 TOPSIS 辨析.

定义 2 设区间值直觉模糊数 $A = ([a_1, b_1], [c_1, d_1])$, 定义 A 的打分函数为

$$\Delta(A) = \frac{(a_1 + b_1 - c_1 - d_1)}{2}. \quad (7)$$

$\Delta(A) \in [-1, 1]$, 当 $A = ([1, 1], [0, 0])$ 时, $\Delta(A) = 1$; 当 $A = ([0, 0], [1, 1])$ 时 $\Delta(A) = 0$; $\Delta(A)$ 越大 A 越大.

3) 不可区分现象算法改进.

根据金属矿山“安全第一、预防为主”的指导方针,相对于 TOPSIS 所研究的对象与安全、对象与危险的相对距离,研究对象与安全的距离具有更高工程价值.因此,用 D^+ 来替代 T_i ,既解决了 TOPSIS 的不可区分性,也更符合工程需求.即

$$T_i = D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_{ij}^+)^2}. \quad (8)$$

4) 逆序现象的改进.

①为解决理想解变化而导致的逆序问题,提出绝对理想解(absolute ideal solution),即取各属

性理论上所能出现的最优状态和最差状态的极限值.

绝对正理想解 $APIS_j = \max \varepsilon_{ij}$

绝对负理想解 $ANIS_j = \min \varepsilon_{ij}$

$$\left. \vphantom{\begin{matrix} \text{绝对正理想解} \\ \text{绝对负理想解} \end{matrix}} \right\} \quad (9)$$

绝对理想解不依附研究对象的具体属性值,其绝对独立性避免了研究对象变更时理想解的变化.

②针对由权重改变引起的逆序现象引入层次分析法(AHP)的优化模型,即改进模糊层次分析法(IFAHP)^[7].权重的确定在整个辨析过程中有着传承性的关键作用,因此,对于定权方法的选择至关重要,且 IFAHP 以三标度、模糊一致矩阵及行归一法不仅最大程度地降低了主观性且提高了计算速度.

5) 确定 TOPSIS 等级量化区间.

将辨析指标不同稳定性等级的区间临界值组成待辨析对象,并且通过 TOPSIS 计算建立基于 TOPSIS 的采空区整体稳定性辨析标准区间.

1.3 ITOPSIS 采空区整体辨析步骤

1) 收集地下采空区稳定性辨析属性指标值,将定性指标(区间值直觉模糊集)按照公式

$$\Delta(A) = \frac{(a_1 + b_1 - c_1 - d_1)}{2}$$

进行均值转化.

2) 建立初始评价矩阵 X_{mn} :

$$X_{mn} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}.$$

$$(10)$$

3) 同趋势化处理,得到 $B_{mn} = (\beta_{ij})_{mn}$.

收益型:

$$\beta_{ij} = [\alpha_{ij} - \min_j(\alpha_{ij})][\max_j(\alpha_{ij}) - \min_j(\alpha_{ij})];$$

$$(11)$$

表 1 采空区整体稳定性等级与辨析指标分级标准

Table 1 Mined-out area global stability degree and indexes grading standards

稳定性等级	采空区稳定性辨析指标												
	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{21}	X_{31}	X_{32}	X_{33}	$X_{34} \times 10^{-3}$	X_{35}	X_{36}	X_{41}	X_{42}	X_{43}
I	1~0.75	1~0.75	60~150	1~0.75	1~0.75	50~120	0.41	6.4~0	100~0	800~0	20~0	1~0.75	1~0.75
II	0.75~0.5	0.75~0.5	50~60	0.75~0.5	0.75~0.5	30~50	0.29	24~6.4	200~100	1200~800	40~20	0.75~0.5	0.75~0.5
III	0.5~0.25	0.5~0.25	40~50	0.5~0.25	0.5~0.25	3~30	40~65	81~24	300~200	2700~1200	50~40	0.5~0.25	0.5~0.25
IV	0.25~0	0.25~0	0~40	0.25~0	0.25~0	0~3	0~0.33	150~81	600~300	8000~2700	120~50	0.25~0	0.25~0

根据换算后的指标区间,取 I 级区间上限值和 IV 级区间下限值作为 APIS 和 ANIS.

$$APIS = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1),$$

$$ANIS = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0).$$

成本型:

$$\beta_{ij} = [\max_j(\alpha_{ij}) - \alpha_{ij}][\max_j(\alpha_{ij}) - \min_j(\alpha_{ij})].$$

$$(12)$$

4) IFAHP 定权 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 对矩阵 B_{mn} 加权处理,得到加权评价矩阵 $C_{mn} = (\varepsilon_{ij})_{mn}$.

$$C_{mn} = (\varepsilon_{ij})_{mn} = B_{mn} \times W.$$

$$(13)$$

5) 确定绝对理想解.

6) 计算贴近度:

$$T_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_{ij}^+)^2}.$$

$$(14)$$

7) 根据 T_i 进行采空区整体稳定性分析.

2 采空区整体稳定性 ITOPSIS 辨析模型构建

2.1 整体稳定性辨析体系建立

结合相关文献从工程应用角度出发,建立如图 1 所示地下金属矿山采空区整体稳定性辨析体系.

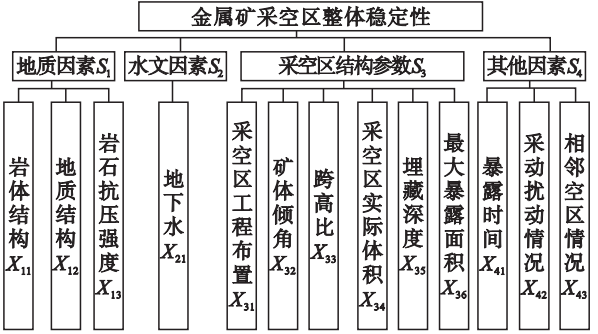


图 1 稳定性辨析指标体系

Fig. 1 Stability discrimination index system

整理采空区整体稳定性辨析指标分级数据见表 1,并根据式(11)、式(12)分别进行无量纲化处理.

2.2 建立 ITOPSIS 稳定性等级量化区间

在建立辨析体系基础上,运用 IFAHP 属性定权,获得辨析指标综合权重 $W = (0.0972, 0.146, 0.0488, 0.125, 0.0686, 0.0311, 0.0938,$

0.056 3 , 0.043 9 , 0.081 4 , 0.104 , 0.069 3 , 0.034 7)^T.

为获取采空区整体稳定性等级量化区间,将不同稳定性等级辨析指标的区间临界值组成五组待辨析对象并以 ITOPSIS 方法计算:

$T_{>I}=(1\ 1\ 150\ 1\ 1\ 120\ 5\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1);$
 $T_{I,II}=(0.75\ 0.75\ 60\ 0.75\ 0.75\ 50\ 1\ 6.4\ 100\ 800\ 20\ 0.75\ 0.75);$
 $T_{II,III}=(0.5\ 0.5\ 50\ 0.5\ 0.5\ 30\ 0.5\ 24\ 200\ 1\ 200\ 40\ 0.5\ 0.5);$
 $T_{III,V}=(0.25\ 0.25\ 40\ 0.25\ 0.25\ 3\ 0.33\ 81\ 300\ 2\ 700\ 50\ 0.25\ 0.25);$
 $T_{<V}=(0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 150\ 600\ 8\ 000\ 120\ 0\ 0).$

表 2 采空区整体稳定性定性辨析指标统计表
Table 2 Qualitative indexes statistical table of mined-out area global stability

采空区 编号	定性指标区间值直觉模糊集			采空区 编号	定性指标区间值直觉模糊集		
1 [#]	X_{11}	X_{12}	X_{21}	2 [#]	X_{11}	X_{12}	X_{21}
	([0.5 0.6], [0.1 0.3])	([0.5 0.6], [0.1 0.2])	([0.6 0.7], [0.2 0.3])		([0.5 0.8], [0.2 0.3])	([0.6 0.7], [0.2 0.3])	([0.6 0.8], [0.3 0.5])
	X_{31}	X_{42}	X_{43}		X_{31}	X_{42}	X_{43}
	([0.4 0.9], [0.1 0.3])	([0.5 0.7], [0.1 0.3])	([0.7 0.9], [0.3 0.4])		([0.5 0.7], [0.2 0.4])	([0.5 0.6], [0.1 0.2])	([0.6 0.9], [0.3 0.5])
3 [#]	X_{11}	X_{12}	X_{21}	4 [#]	X_{11}	X_{12}	X_{21}
	([0.4 0.5], [0.1 0.2])	([0.5 0.6], [0.1 0.3])	([0.6 0.8], [0.2 0.4])		([0.7 0.9], [0.4 0.5])	([0.6 0.9], [0.3 0.4])	([0.4 0.8], [0.2 0.3])
	X_{31}	X_{42}	X_{43}		X_{31}	X_{42}	X_{43}
	([0.5 0.6], [0.2 0.3])	([0.4 0.7], [0.2 0.3])	([0.5 0.7], [0.2 0.4])		([0.3 0.5], [0.1 0.2])	([0.7 0.8], [0.2 0.4])	([0.6 0.7], [0.2 0.3])
5 [#]	X_{11}	X_{12}	X_{21}	6 [#]	X_{11}	X_{12}	X_{21}
	([0.3 0.6], [0.1 0.2])	([0.6 0.9], [0.2 0.4])	([0.4 0.6], [0.1 0.3])		([0.3 0.5], [0.1 0.3])	([0.3 0.5], [0.1 0.4])	([0.4 0.5], [0.2 0.4])
	X_{31}	X_{42}	X_{43}		X_{31}	X_{42}	X_{43}
	([0.2 0.5], [0.1 0.2])	([0.3 0.6], [0.2 0.3])	([0.5 0.8], [0.3 0.4])		([0.5 0.6], [0.3 0.4])	([0.3 0.5], [0.2 0.3])	([0.5 0.7], [0.1 0.4])
7 [#]	X_{11}	X_{12}	X_{21}	8 [#]	X_{11}	X_{12}	X_{21}
	([0.6 0.9], [0.3 0.4])	([0.3 0.8], [0.1 0.2])	([0.6 0.7], [0.2 0.5])		([0.4 0.7], [0.2 0.3])	([0.7 0.8], [0.1 0.5])	([0.3 0.6], [0.1 0.5])
	X_{31}	X_{42}	X_{43}		X_{31}	X_{42}	X_{43}
	([0.5 0.7], [0.1 0.5])	([0.7 0.8], [0.3 0.5])	([0.2 0.6], [0.2 0.3])		([0.4 0.6], [0.2 0.4])	([0.2 0.5], [0.1 0.3])	([0.4 0.5], [0.1 0.2])
9 [#]	X_{11}	X_{12}	X_{21}	10 [#]	X_{11}	X_{12}	X_{21}
	([0.4 0.8], [0.2 0.5])	([0.3 0.7], [0.1 0.5])	([0.6 0.7], [0.3 0.5])		([0.6 0.7], [0.2 0.3])	([0.5 0.6], [0.1 0.4])	([0.7 0.8], [0.3 0.6])
	X_{31}	X_{42}	X_{43}		X_{31}	X_{42}	X_{43}
	([0.2 0.5], [0.1 0.3])	([0.4 0.6], [0.2 0.6])	([0.2 0.8], [0.2 0.5])		([0.7 0.9], [0.2 0.5])	([0.5 0.7], [0.2 0.4])	([0.5 0.9], [0.3 0.4])

经计算 $T_{>I}$ 、 $T_{I,II}$ 、 $T_{II,III}$ 、 $T_{III,V}$ 及 $T_{<V}$ 的贴近度,便形成了基于 ITOPSIS 地下金属矿山采空区整体稳定性的等级量化区间: $T_I \in (0.0, 0.1040)$, $T_{II} \in (0.1040, 0.1570)$, $T_{III} \in (0.1570, 0.2146)$, $T_V \in (0.2146, 0.3030)$.

2.3 采空区 ITOPSIS 辨析应用

将采空区整体稳定性 ITOPSIS 辨析模型应用于某地下金属矿山多组采空区.该矿段处于泥盆系中统东岗岭阶上亚群(D₂d_b),由层纹状粉砂岩、白云质灰岩、灰黑页岩组成,岩体稳固性较高,矿房采场相对稳定,局部区域的采空区出现大岩块塌落的现象.本文列出其中 10 组采空区数据,其调查统计数据分别参见表 2、表 3.

表 3 采空区整体稳定性辨析定量属性指标
Table 3 Quantitative indexes of mined-out area global stability

编号	定量属性指标值						
	X_{13}	X_{32}	X_{33}	X_{34}	X_{35}	X_{36}	X_{41}
1 [#]	129	93	0.89	55	128	230	15
2 [#]	129	30	0.48	88.3	585	610	20
3 [#]	82.8	26	0.29	108.3	182	2 450	65
4 [#]	82.8	30	0.48	128.3	585	1 550	20
5 [#]	82.8	26	0.55	128.3	476.5	770	30
6 [#]	53.6	22	0.25	96.7	643	2 980	76
7 [#]	93.6	70	0.56	85	529	510	35
8 [#]	93.6	70	0.56	118.3	524	710	45
9 [#]	93.6	70	0.71	88.3	420	530	40
10 [#]	46.4	67	0.45	88.3	405	530	50

根据 ITOPSIS 步骤 ,获得各采空区贴近期值及相应的整体稳定性等级 ,参见表 4.

表 4 采空区贴近期及稳定性等级划分 Table 4 Closeness and stability classification					
编号	贴近期	等级	编号	贴近期	等级
1 [#]	0.097 997	I	6 [#]	0.226 222	IV
2 [#]	0.148 611	II	7 [#]	0.146 716	II
3 [#]	0.142 396	II	8 [#]	0.176 336	III
4 [#]	0.152 747	II	9 [#]	0.182 712	III
5 [#]	0.153 682	II	10 [#]	0.146 069	II

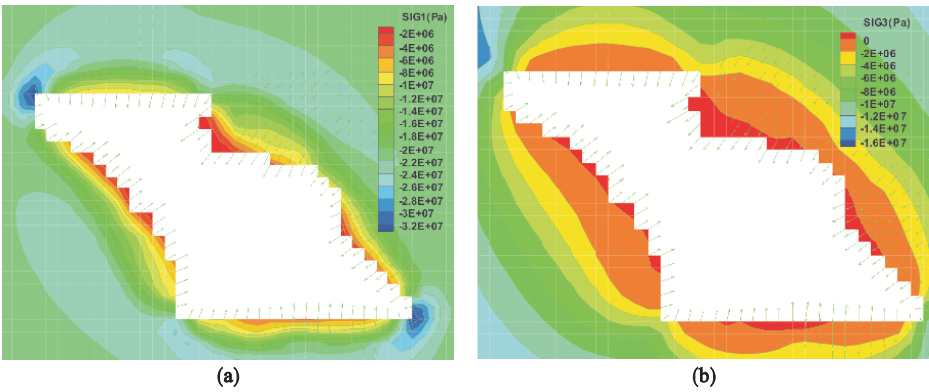


图 2 主应力分布
Fig. 2 Principal stress distribution
(a)—最大主应力分布 ;(b)—最小主应力分布.

利用 Flac^{3d} 内嵌 FISH 语言对 Mohr-Coulomb 准则下 PSF 的实现进行编程计算. 图 3 为 2[#]及 4[#]采空区顶板 PSF 最小值所在的水平线(X 方向)安全系数曲线图 ,两个采空区的 PSF 曲线走势均呈现曲线波形状. 随着与采空区距离的减小 ,PSF 呈非线性降低 ,最小值及波谷位于采空区顶板大约中心位置. 2[#]采空区顶板 PSF 最小值为 1.56 ,而 4[#]采空区顶板位置 PSF 最小值为 1.44.

3 基于 PSF 的局部稳定性分析

点安全系数是能够实现在宏观分析的基础上精确地反映研究对象局部安全状况的手段^[8-9]. 为了对采矿区进行局部稳定性分析并验证 ITOPSIS 的准确性 ,对 ITOPSIS 辨析结果均为 II 级稳定性且处于同一埋深的 2[#]及 4[#]采空区进行基于 PSF 的局部稳定性分析.

根据该金属矿所提供的采场工程布置平面图 ,确定模型在 X ,Y ,Z 方向的尺寸为 :200 m × 200 m × 200 m ,含单元 259 200 组 ,节点 272 363 个. 2[#]及 4[#]采空区 ,水平范围分别在[81 ,102] , [102 ,120]之间. 由于篇幅关系 ,仅列出 2[#]采空区数值分析图.

由图 2 主应力分布云图分析 2[#]采空区应力场 ,在采空区边界及角点出现应力集中 ,最大主应力为 - 32.14 ~ - 0.56 MPa ,最小主应力为 - 17.21 ~ 1.47 MPa ,空区底部和东西边界处形成了拉应力区 ,最大拉应力值为 1.47 MPa ,小于围岩的抗拉强度 2.37 MPa. 表 5 为 2[#]和 4[#]采空区各项模拟结果指标数值.

表 5 采空区数值指标比较 Table 5 Numerical indexes of different scheme				
采空区 编号	最大压 应力/MPa	最大拉 应力/MPa	最大纵向 位移/cm	最大水平 位移/cm
2 [#]	32.34	1.47	3.81	2.68
4 [#]	36.52	1.96	5.33	3.74

图 4 为 2[#]和 4[#]采空区两顶板边界线 PSF 曲线图. 比较发现 ,PSF 在顶板边界线变化都是由高到低 ,在大约顶板中心时 PSF 降到最低 ,但在 4[#]

北侧采空区边界处的 PSF 普遍小于其他 3 条曲线 PSF 2#采空区北侧点安全系数比其他曲线高. 因此,从点安全系数层面分析,2#采空区比 4#采空区稳定性更高,同时也验证了 ITOPSIS 的准确性.

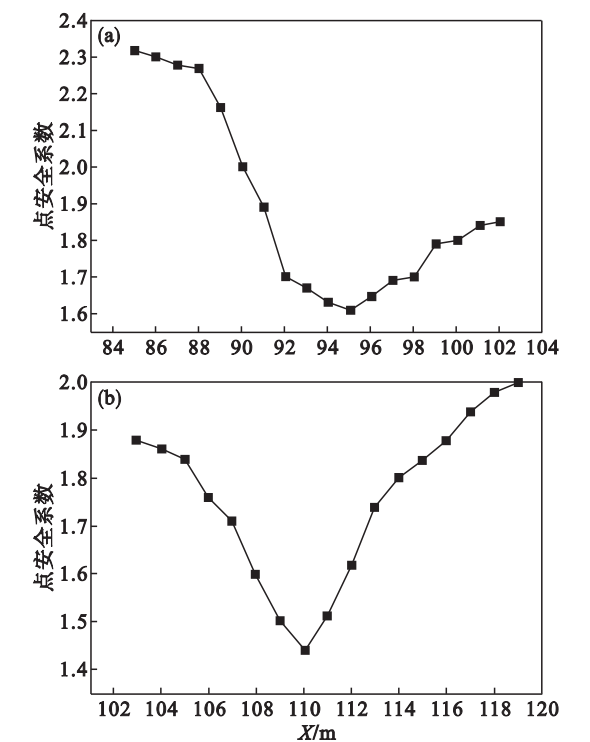


图 3 2#和 4#采空区顶板中心线点安全系数曲线图
Fig. 3 Point safety factor graphs of #2 & #4 gob roof centerline
(a)—2#采空区顶板中心线 PSF 曲线图；
(b)—4#采空区顶板中心线 PSF 曲线图.

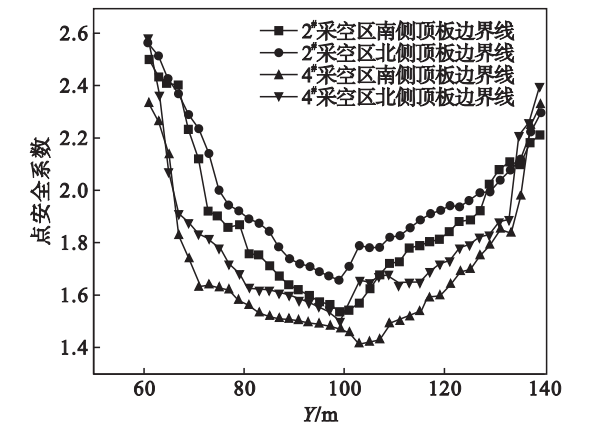


图 4 2#和 4#采空区顶板边界线 PSF 曲线图
Fig. 4 PSF graphs of #2 & #4 gob roof boundary line

4 结 论

1) 在整体稳定性辨析阶段对 TOPSIS 改进：
①将 IVIFS 运用于采空区定性指标定量描述,通

过均值转化实现了 IVIFS 和实数指标共存下 TOPSIS 的运行；②改进相对贴近度公式避免了不可区分现象；③利用绝对正负理想解及 IFAHP 定权方法规避了逆序现象.

2) 运用不同等级区间临界值实现了 TOPSIS 对采空区稳定性宏观等级划分,并将 ITOPSIS 运用于某金属矿山采空区整体稳定性宏观辨析.

3) 在局部辨析阶段,利用以点安全系数为基础的数值分析对 ITOPSIS 辨析结果进行稳定性分析验证.文章从整体和局部两个层面为采空区稳定性综合辨析提供便捷且新颖清晰的思路.

参考文献：

[1] Luo Z Q ,Zuo H Y ,Jia N ,et al. Instability identification on large scale underground mined-out area in the metal mine based on the improved FRBFNN[J]. *International Journal of Mining Science and Technology* 2013 ,23(6) 821 - 826.

[2] Bilbao-Terola A ,Arenas-Parraa M ,Cañal-Fernándezb V ,et al. Using TOPSIS for assessing the sustainability of government bond funds[J]. *Omega* 2014 ,49 :1 - 17.

[3] Junior F R L ,Osiro L ,Carpinettia L C R. A comparison between fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods to supplier selection[J]. *Applied Soft Computing* 2014 ,21 :194 - 209.

[4] Wang Y ,Yeo G T ,Ng A K Y. Choosing optimal bunkering ports for liner shipping companies :a hybrid Fuzzy-Delphi - TOPSIS approach[J]. *Transport Policy* 2014 ,35 :358 - 361.

[5] Zhang Q S ,Xing H Y ,Liu F C ,et al. Some new entropy measures for interval-valued intuitionistic fuzzy sets based on distances and their relationships with similarity and inclusion measures[J]. *Information Sciences* 2014 ,283(1) 55 - 69.

[6] Qi X W ,Liang C Y ,Zhang J L. Generalized cross-entropy based group decision making with unknown expert and attribute weights under interval-valued intuitionistic fuzzy environmen[J]. *Computers & Industrial Engineering* 2015 ,79 :52 - 64.

[7] 贾楠 ,罗周全 ,谢承煜 ,等. 考虑安全的 IFAHP - 模糊物元露天采场爆破效果评价[J]. *爆破* 2013 ,30(1) 20 - 24.
(Jia Nan ,Luo Zhou-quan ,Xie Cheng-yu ,et al. Safety-considered blasting effect evaluation by IFAHP-based fuzzy matter-element at open pit[J]. *Blasting* 2013 ,30(1) :20 - 24.)

[8] Duncan J M. State of the art :limit equilibrium and finite element analysis of slopes[J]. *Journal of Geotechnical Engineering* ,1996 ,122(7) 577 - 596.

[9] Fang C H ,Han X ,Duan Y H ,et al. Analysis on dam-break case of concrete arch dam and forecast of failure scope based on point safety factor[J]. *Procedia Engineering* ,2012 ,28 :617 - 619.