

文章编号: 1674-9669(2016)02-0083-05  
DOI: 10.13264/j.cnki.ysjskx.2016.02.015

## 基于模糊贴近度的下向进路侧帮矿体稳定性评价

何书<sup>1,2,3</sup>, 赵奎<sup>1,2</sup>, 高琪琪<sup>1</sup>, 汪贊<sup>1</sup>

(1.江西理工大学资源与环境工程学院,江西 赣州 341000;2.江西省矿冶环境污染控制重点实验室,江西 赣州 341000;  
3.西北大学地质学系/大陆动力学国家重点实验室,西安 710069)

**摘要:** 在综合分析下向进路侧帮矿体特点及其稳定性影响因素的基础上,参考大量实例及专家意见,建立侧帮稳定性等级及其指标评分体系。在此基础上,基于模糊贴近度理论,建立下向进路侧帮矿体稳定性评价模型。在模型构建过程中,结合梯形分布函数和信息分配原理,建立各评价指标的隶属度函数,基于海明距离算法计算待评价模糊子集与标准模糊子集的贴近度,利用层次分析法确定各评价指标的权重,最后采用最大隶属度原则确定评价对象的稳定性级别。以江西某金属矿山某采场为例,利用构建的评价模型,进行对比评价,经现场观察,评价结果与实际情况基本一致,说明所建方法是合理和可靠的。

**关键词:**模糊贴近度; 下向进路; 稳定性; 评价模型; 矿体

中图分类号:TD325 文献标志码:A

## Fuzzy approach degree-based research on stability of ore body at underhand cut-and-fill drifts side

HE Shu<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Kui<sup>1,2</sup>, GAO Qiqi<sup>1</sup>, WANG Yun<sup>1</sup>

(1. School Resources Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology; Ganzhou 341000, China;  
2. Jiangxi Key Laboratory of Mining & Metallurgy Environmental Pollution Control, Ganzhou 341000, China;  
3. Department of Geology/State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, 710069, China)

**Abstract:** Based on analyzing the characteristics and major affecting factors of stability of ore body at underhand cut-and-fill drift, and referring to a great deal of instances and expertise, an index evaluation system of stability of ore body was established. On this bases, a model to make an assessment of stability of ore body was established by using fuzzy approach. In the process, combining the trapezoidal distribution function and information distribution principle, a membership function of evaluation index was established, the weighing of evaluation index was defined by AHP, and the fuzzy proximity was calculated between the evaluation target fuzzy set and the standard set by hamming distance. At last, the stability level of the object was defined by the maximum membership principle. Few examples of a metal mine in Jiangxi was evaluated by using this model. Through field investigation and comparative analysis, the evaluation results are basically consistent with the actual situation which indicates that the evaluation method is reasonable and credible.

**Keywords:** fuzzy approach degree; underhand cut-and-fill drift; stability; evaluation model; ore body

随着下向进路胶结充填采矿方法在金属矿山中的广泛采用,由于采矿进路顶板充填假顶的存在,大大提高了巷道的稳定性<sup>[1]</sup>。因此,在以往的研究中,进

路顶板充填体的稳定性一直受到足够重视<sup>[2-7]</sup>,进路侧帮矿体的稳定性则关注较少。进路侧帮矿体的稳定性是进路稳定性的重要组成部分,进路侧帮若失

收稿日期:2015-07-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51364012);江西省青年科学基金资助项目(2010GQC0049);江西理工大学科学基金资助项目(NSFJ2015-G01);江西省矿业工程高水平学科经费资助项目(3304000002)

通信作者:何书(1978- ),男,博士,副教授,主要从事水文地质与工程地质方面的研究,E-mail: 769844918@qq.com.

稳,必将影响到充填体顶板的稳定性<sup>[8]</sup>.何书等<sup>[9-10]</sup>对下向进路侧帮矿体稳定性分析表明,进路侧帮不仅与矿体本身的地质特性有关,而且受到上覆充填体和地应力的影响.侧帮矿体受多种因素的控制与影响,如果能够获取进路充足的数据信息,基于经典力学原理,能够对进路侧帮及顶板进行稳定性计算,进而评估其稳定程度.然而,影响进路侧帮矿体稳定的因素较为复杂,一些因素具有明显的模糊性,经典力学方法难以处理这些信息.模糊数学方法在矿山巷道围岩变形预测、巷道支护、稳定性评价等方面得到广泛应用<sup>[11-14]</sup>,在处理不确定信息方面有着重要价值.模糊贴近度作为模糊识别的一种重要方法,通过构建标准模型,能够对待识别对象进行分类分级,在诸多领域均有广泛应用<sup>[15-20]</sup>,但在下向进路采场稳定性评级的应用中尚未见报道.结合下向胶结充填采矿进路特点,建立一种简单有效的侧帮矿体稳定性评价方法,可为优化下向进路设计提供必要依据.

## 1 方法与原理

模糊贴近度是识别算法中隶属度函数的一种确定方法.若待识别对象由  $m$  个特征来刻画,且可由一个模糊子集来表示,则可利用贴近度与择近原则来进行识别.

设论域  $U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  有  $n$  个模糊子集  $A_1, A_2, \dots, A_n$ ,代表  $n$  个类型,构成标准模型库,每个类型由  $m$  个特征来刻画:

$$A_i=(A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{im}), i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

设有一待识别的模型为  $B=(B_1, B_2, \dots, B_m)$ ,该模型由  $m$  个特性来刻画,为论域  $U$  上的一个模糊子集.若以某种贴近度算法分别计算模型  $B$  与  $A_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 的贴近度,则利用最大隶属度原则可判定  $B$  归属于标准模型库  $A_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 中的某一类.贴近度

的算法可根据实际情况进行选择,通常可采用试算的方法选择最佳的算法.

计算识别模型与标准模型之间的贴近度,对比各特征值的贴近度大小,然后作取小计算:

$$S_i = \wedge \{N(A_{ij}, B_j) | 1 \leq j \leq m\}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

若有  $k \in \{1, 2, \dots, n\}$ ,使  $S(A_k, B) = \vee \{S_i | 1 \leq i \leq n\}$ ,则称  $B$  与  $A_k$  最贴近,于是可把模糊子集  $B$  归于模糊子集  $A_k$  类.

## 2 构建下向进路侧帮矿岩体稳定性的模糊贴近度评价模型

### 2.1 评价指标的确定

影响进路侧帮的影响因素较多,包括侧帮本身及充填体顶板.何书等<sup>[8,21]</sup>深入分析了充填体顶板对进路侧帮可动块体的影响,研究成果表明,回采断面跨高比是影响进路侧帮稳定性的重要因素.在此,假设充填体顶板是稳定的,它对侧帮稳定性的影响选择跨高比来分析.同时,进路侧帮矿体稳定性的影响因素还包括:矿体完整性、矿体强度、地下水条件、地应力方位、结构面状态和主干节理方位,分别选用  $RQD$  值、单轴抗压强度、每 10 m 洞身的流量、结构面与进路轴线的夹角、粗糙系数、最大水平主应力与进路轴线夹角来描述.在分级标准的确定中,参考现有工程岩体质量评价标准,并结合下向进路侧帮的工程特征及大量工程实例,以确定相应的标准值,各评价指标及其评价标准见表 1. 在制定该评分标准过程中,充分考虑指标分级的合理性以及指标获取的可行性.

进路侧帮的稳定性,设 5 个稳定性级别,各级别及定性特征描述详见表 2. 具体进路对应的特征并非完全与表 2 中所列特征完全一致,而是与该级别特征的一个或多个相同.

表 1 评价指标及分级标准

Table 1 Evaluation index and grading standards

分类 级别	矿体单轴抗 压强度 /MPa	岩体完整性 $RQD$ 值 /%	结构面粗糙 系数 (JRC)	地下水条件 每 10 m 洞 身的流量 / $(L \cdot min^{-1})$	回采断面 跨高比	结构面方位(主干节理与 进路轴线的夹角) / $(^{\circ})$	地应力方位(最大水平主应力 与进路轴线的夹角) / $(^{\circ})$
稳定	>100	90~100	16~20	0	<1	>60	<20
界限值	100	90	16	0	1	60	20
基本稳定	60~100	75~89	12~16	<10	1~1.5	60~50	20~30
中间值	80	82.5	14	10	1.25	55	25
中等稳定	30~60	50~75	8~18	10~25	1.5~2.0	50~40	30~40
中间值	45	62.5	10	17.5	1.75	45	35
不稳定	15~30	25~50	4~8	25~125	2.0~2.5	40~30	40~60
中间值	22.5	37.5	6	75	2.25	35	45
极不稳定	<15	<25	0~4	>125	>2.5	<30	>60
界限值	15	25	4	125	2.5	30	60

表 2 稳定性分级及定性特征  
Table 2 Stability grading and qualitative characteristics

分类级别	定性特征
稳定	矿体坚硬,单轴抗压强度极高,完整性非常好,结构面不发育,结构面壁很粗糙,且紧闭,矿体干燥,跨高比小于等于 1,主干节理、最大水平地应力与进路轴向近垂直相交;侧帮矿体非常稳定.
基本稳定	矿体坚硬,强度高,完整性较好,结构面不发育,结构面壁稍粗糙,且张开度非常小,矿体潮湿,跨高比较小,主干节理、最大水平地应力与进路轴向呈大角度相交侧帮;矿体基本稳定.
稳定中等	矿体较坚硬,较为破碎,结构面发育,结构面壁稍粗糙,且张开度小于 1 mm,有裂隙水流出,跨高比中等,主干节理、最大水平地应力与进路轴向呈中等角度相交;侧帮矿体稳定性中等,较坚硬岩,局部有掉块现象.
稳定性差	矿体强度较低,较坚硬矿体破碎,较软岩或软硬岩互层,结构面非常发育,结构面壁光滑,张开度在 1~5 mm 之间,矿体有裂隙水涌出,跨高比较大,主干节理、最大水平地应力与进路轴向呈小角度相交,巷道稳定性较差;矿体为坚硬岩时,片帮明显;矿体为软岩时,局部地段有垮塌现象.
不稳定	矿体强度低,矿体极为破碎,多为软岩,结构面极为发育,结构面壁平直,张开度大于 5 mm,矿体有大量裂隙水涌出,跨高比大,主干节理、最大水平地应力与进路轴向近于平行,侧帮矿体有整体垮塌的危险.

## 2.2 隶属度函数的确定

隶属度函数的确定一直是困扰模糊数学方法在实际应用中的一个重要方面,尽管前人在这方面进行了大量的研究工作,但隶属度确定的困难问题依然没有得到根本解决.根据评价指标的变化特征选取合适的隶属度函数,然后通过试算的办法选择最佳函数仍不失为一种有效的方法.

由表 1 可知,下向进路侧帮稳定性的 7 个评价指标的数值变化具有明显的连续性和单调性.如矿体单轴抗压强度,强度值是连续变化的,且随着强度值的增大,矿体显然越来越稳定.反之,回采断面的跨高比越大,侧帮则越不稳定.每个指标各稳定性级别的变化差值是有所不同的,并非是完全的等差变化,如地下水条件,涌水量稳定性差这一级别中是一个较大的数值区间,而在其他稳定性较好的级别中数值的区间范围却不大,说明其变化并不线性.在评价标准中,每一个级别的各指标均有一个界限值或中间值,说明某一指标实际值越靠近界限值或中间值,其进路稳定性也越靠近界限值和中间值对应的稳定性级别.设进路的某一指标的信息量为 1,将该信息量以其所在稳定性级别为中心分配到各级别中,其所在级别将获得最大的信息量,其余级别获得的信息量将随着对应级别的中间值或界限值与实际值的距离增加而减少.信息量在不同级别的分布与最高和最低级别界限值的差值存在一定的关系,在构建不同指标的隶属度函数时需要考虑.因此,尽管各指标选择了相同的函数类型,但函数的相关参数选择考虑了对应指标在评分体系中的变化特征.可以用来构建该问题隶属度函数的分布函数较多,如正态分布、柯西分布、梯形分布等.经过大量的试算,最后选择梯形

分布作为隶属度函数,见式(3),其中  $x_j$  表示第  $j$  个指标的实际值,  $A_{ij}$  代表分级标准中第  $i$  个稳定性级别的第  $j$  个指标的中间值或界限值(见表 1),  $b$  为一个隶属度大小调整参数.该隶属度函数较好的体现了实际值与标准值之间的差异,通过差异的大小来决定隶属函数的大小.与一般的梯形分布不同的是,在函数中加入了一个调整参数,该参数为大于 1 的小数,可根据隶属度的计算结果进行适度调整,以凸显不同级别隶属度的区分度.由于某指标实际值与某一级别对应的中间值或界限值之差可能大于该指标最大界限值与最小界限值之差,根据式(3)计算的隶属度将出现小于 0 的情况,说明二者相差甚远,这时可直接对隶属度赋值为 0.

$$\mu_{ij}(x_j)=1-\left| \frac{(x_j-A_{ij})}{b} \right| \quad (3)$$

其中  $i=1, 2, \dots, 5; j=1, 2, \dots, 7$ .

例如,某回采进路矿岩单轴抗压强度为 50 MPa,对应的稳定级别为稳定性中等,将该值带入式(3)中,并进行归一化处理,可得关于隶属于稳定性分级的一个模糊集:

$$\mu=\frac{0.1176}{s_1}+\frac{0.4706}{s_2}+\frac{1.0}{s_3}+\frac{0.5147}{s_4}+\frac{0.3824}{s_5} \quad (4)$$

由以上计算结果可看出,该进路单轴抗压强度对应的稳定性级别最有可能为稳定性中等,因与相邻稳定性级别的中间值或界限值的差值不同,对应的隶属度亦各不相同.

## 2.3 评价指标权重的确定

进路侧帮稳定性的 7 个评价指标采用层次分析法计算其权重.通过对比各指标的相对重要性,构造判断矩阵,计算权重,并进行一致性检验,最后确定各指标的权重如表 3 所列.

表3 评价指标权重  
Table 3 Weights of evaluation indexes

评价指标	矿体单轴抗压强度 /MPa	岩体完整性 RQD 值 /%	结构面粗糙度	地下水条件 每 10 m 洞身的流量 /(L·min⁻¹)	回采断面跨高比	结构面方位主干节理与进路轴线的夹角 /°	地应力方位最大水平主应力方向与进路轴线的夹角 /°
权重	0.18	0.29	0.15	0.1	0.11	0.1	0.07

## 2.4 模糊贴近度的计算

将表1中的分值代入式(3),计算标准模糊子集:

$$A = (A_1, A_2, A_3, A_4, A_5) \quad (5)$$

每个模糊子集由7个指标来描述:

$$A_n = (A_{1n}, A_{2n}, \dots, A_{7n}) \quad (n=1, 2, \dots, 5) \quad (6)$$

若  $B$  为待识别的模糊集,记为:

$$B = (B_1, B_2, \dots, B_7) \quad (7)$$

其中  $B_m (m=1, 2, \dots, 7)$  为各指标属于不同稳定性级别的隶属度,由5个模糊子集构成.

经反复计算,最后采用以下公式计算贴近度:

$$N(A_{nm}, B_m) = 1 - \delta(A_{nm}, B_m) \quad (8)$$

式(8)中:

$$\delta(A_{nm}, B_m) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(\mu_{A_{ni}} - \mu_{B_m})| \quad (9)$$

其中  $m=1, 2, \dots, 7; n=1, 2, \dots, 5$ .

## 2.5 进路侧帮稳定性级别的判定

给出一个由7个指标构成的待评判的进路侧帮实例,每一个指标由式(8)和式(9)计算出该指标属于各评判级别的隶属度.并考虑各指标的权重,设  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_7)$ ,于是有:

$$S_n = \bigwedge \{\omega_m * N(A_{mn}, B_m) \mid 1 \leq m \leq 7\} \quad (10)$$

其中  $n=1, 2, \dots, 5$ .

为体现待评价对象属于各等级的差异大小,可对  $S_n$  进行归一化处理.最后作取大计算:

$$S(A_k, B) = \bigvee \{S_n \mid 1 \leq n \leq 5\}, k=1, 2, \dots, 5 \quad (11)$$

于是判定评估进路侧帮稳定性属于第  $k$  级.

## 2.6 工程实例

江西某铜矿采用下向胶结充填采矿法采矿,结合某盘区的回采情况,对3条采场进路进行模糊贴近度评价,进路指标分值详见表4.首先基于以上方法,在 MATLAB 软件中编制相应计算程序,利用实例进行

模糊贴近度的相关计算.

首先将表1中各评价级别对应指标的界限值或中间值代入式(3)中,构建标准模糊子集,它由5个  $5 \times 7$  的模糊矩阵构成.然后将表4中3条进路的具体分值代入式(3)中,计算相应的隶属度,其中进路1的计算结果见式(12),另外两条进路可计算出类似结果.

$$\begin{array}{ccccccccc} & & & & & & \mu_1 = & & \\ & 0.382 & 4 & 0.769 & 2 & 0.25 & 0.932 & 8 & 1.0 & 1 & 0.812 & 5 \\ & 1.0 & & 1.0 & & 0.5 & 1.0 & & 0.75 & 0.25 & 1.0 \\ & 0.647 & 1 & 0.596 & 2 & 1.0 & 0.857 & 2 & 0.25 & 0 & 0.625 \\ & 0.25 & & 0.019 & 2 & 0.5 & 0.167 & 2 & 0 & 0 & 0.25 \\ & 0.117 & 7 & 0 & & 0.25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \quad (12)$$

将式(12)的结果代入式(8)及式(9),计算结果如下:

$$\begin{array}{ccccccccc} & 0.129 & 7 & 0.156 & 9 & 0.127 & 8 & 0.104 & 7 & 0.101 & 3 \\ & 0.262 & 9 & 0.284 & 4 & 0.215 & 1 & 0.139 & 4 & 0.127 & 5 \\ & 0.096 & 4 & 0.101 & 8 & 0.150 & 0 & 0.101 & 8 & 0.096 & 4 \\ S'_1 = & 0.095 & 4 & 0.097 & 7 & 0.092 & 6 & 0.051 & 5 & 0.042 & 5 \\ & 0.110 & 0 & 0.098 & 2 & 0.070 & 7 & 0.051 & 1 & 0.055 & 0 \\ & 0.089 & 3 & 0.078 & 6 & 0.060 & 7 & 0.050 & 0 & 0.053 & 6 \\ & 0.062 & 5 & 0.070 & 0 & 0.054 & 4 & 0.043 & 1 & 0.034 & 4 \end{array} \quad (13)$$

对  $S'_1$  每一行先乘以权重,然后对每一列取小,并归一化后得:

$$S_1 = \{0.892 9, 1.00, 0.776 8, 0.616 1, 0.491 1\} \quad (14)$$

由最大隶属度原则,进路1侧帮岩体的稳定性级别为基本稳定.重复以上步骤,可分别计算进路2和进路3的评价结果,见式(15)和式(16),其评价等级分别为基本稳定和稳定中等.

表4 各进路指标分值  
Table 4 Values of each extracting drift

评价指标	矿体单轴抗压强度 /MPa	岩体完整性 RQD 值 /%	结构面粗糙度	地下水条件 每 10 m 洞身的流量 /(L·min⁻¹)	回采断面跨高比	结构面方位(主干节理与进路轴线的夹角 /°)	地应力方位(最大水平主应力方向与进路轴线的夹角 /°)
进路 1	65	80	10	5.6	1	70	25
进路 2	60	60	6	6.2	1	56	30
进路 3	50	62	12	6.5	1.3	40	28

$$S_2 = \{0.883\ 5, 1.000\ 0, 0.932\ 0, 0.699\ 0, 0.563\ 1\} \quad (15)$$

$$S_3 = \{0.865\ 8, 0.927\ 6, 1.000\ 0, 0.766\ 2, 0.614\ 7\} \quad (16)$$

通过现场调查,评价结果与进路实际情况基本一致。

### 3 结 论

1)结合金属矿山下向进路采场侧帮矿体的特征,综合考虑了侧帮矿体的力学特征、地下水、回采断面及地应力等多个评价指标,构建了下向进路侧帮矿体的评价指标及稳定性分级体系。

2)在隶属度函数构建中,充分考虑了各评价指标在不同稳定性级别的数值变化,引入了调整因子,使得在不同指标的隶属度计算中信息分配更加合理。

3)以江西某地下金属矿山某采场为例,采用构建的评价方法,对该区某采场的进路侧帮矿体进行了稳定性评价,经现场调查对比分析,其稳定性特征与评价结果基本一致,证明所建立的评价方法是合理和适用的。

4)下向进路侧帮稳定性评价方法的构建是一个不断完善的动态过程,如何有效考虑充填体和地应力大小对侧帮稳定性的影响,进一步优化本文构建的评价体系及方法,可作为今后进一步研究的方向。

### 参考文献:

- [1] 胡汉华,何发龙,魏亚兴.下向进路胶结充填技术工艺参数模拟研究[J].矿业研究与开发,2013,33(1):5~8.
- [2] 尚雪义,李夕兵,王泽伟,等.基于PLS的下向进路多参数优化方法[J].科技导报,2015,33(1): 63~69.
- [3] 纪永刚,彭康,赵杰,等.基于经济指标的下向进路断面安全系数法分析[J].金属矿山,2015(1):34~38.
- [4] 韩斌,张升学,邓建,等.基于可靠度理论的下向进路充填体强度确定方法[J].中国矿业大学学报,2006,35(3):372~376.
- [5] 韩斌,吴爱祥,邓建,等.基于可靠度理论的下向进路胶结充填技术分析[J].中南大学学报(自然科学版),2006,37(3):583~587.
- [6] 王晓军,付振涛,程秋亭,等.合理布筋方式提高顶板充填体稳定性试验研究[J].有色金属科学与工程,2011,2(1):73~76.
- [7] 赵奎,胡源,王晓军,等.采场顶板稳定性位移与声发射组合识别研究[J].有色金属科学与工程,2015,6(3): 72~77.
- [8] 何书,赵奎.下向进路侧帮可动块体的稳定性力学分析[J].金属矿山,2012,41(12): 5~8.
- [9] 何书,吴开兴,陈飞,等.水平地应力对下向进路可动块体稳定性影响的分析[J].矿业研究与开发,2014,34(2):18~21.
- [10] 何书.下向进路侧帮稳定性及进路布置方式优化设计研究[D].西安:西北大学,2009.
- [11] 汪明武,李丽,金菊良.围岩稳定性集对分析——可变模糊集综合评价模型[J].岩土工程学报,2008,30(6): 941~944.
- [12] 靖洪文,吴俊浩,马波,等.基于模糊灰色系统的深部巷道围岩变形预测模型及应用[J].煤炭学报,2012,37(7): 1099~1104.
- [13] 申艳梅,韦四江.回采巷道锚杆支护效果模糊综合评判[J].采矿与安全工程学报,2011,28(4): 576~580.
- [14] 邓军,徐通模,王华,等.巷道煤体破碎程度的模糊综合评判[J].煤炭学报,2003,28(2):145~148.
- [15] 王亚琼,周绍文,孙铁军,等.基于模糊贴近度的公路隧道结构健康评价[J].公路交通科技,2014,31(12):78~83.
- [16] 高菲,江山,李亚宁.基于模糊贴近度的产业集群生命周期判定方法[J].计算机集成制造系统,2014,20(12):3097~3103.
- [17] 田海江.模糊贴近度的覆盖粗糙模糊集不确定性度量研究[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2014,26(2): 276~279.
- [18] 秦书玉,孙平.矿井通风系统的模糊贴近度优化评价法[J].辽宁工程技术大学学报,2005,24(1): 23~25.
- [19] 石永莲,严宁珍,倪九派.基于模糊贴近度法的白河水水质评价[J].中国农村水利水电,2014(9):47~52.
- [20] 关全成,赵双喜,刘江峰,等.模糊贴近度法在水质评价中的应用[J].节水灌溉,2012(7):43~46.
- [21] 何书,王家鼎,朱忠,等.基于模糊贴近度的岩溶塌陷易发性研究[J].自然灾害学报,2009,18(1): 8~13.