

文章编号: 1673-3363-(2015)02-0206-07

# 基于层次分析-模糊聚类分析法的 导水裂隙带发育高度研究

杨国勇<sup>1</sup>, 陈超<sup>2</sup>, 高树林<sup>3</sup>, 冯波<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 山西天地王坡煤业有限公司,  
山西 晋城 048021; 3. 枣庄矿业集团新安煤矿, 山东 微山 277642)

**摘要** 为了较全面地考虑煤层顶板导水裂隙带发育高度的影响因素, 在结合大量生产实践的基础上, 分别从开采厚度、开采深度、工作面斜长、岩石抗压强度、岩层组合特征等因素进行分析, 对各影响因素构造了影响指标并进行量化, 采用层次分析法研究影响因素的权重, 采用模糊聚类分析法对工作面的裂隙带发育高度进行聚类。10个工作面的数据验证结果表明: 开采厚度是影响导水裂隙带发育高度的主要因素之一, 其他几个因素也是影响导水裂隙带发育的主要因素。研究所得结果与经验值和实测值都基本相似, 说明本文选取方法是合理的, 为煤矿预测煤层顶板裂隙带发育高度提供了一种新的方法。

**关键词** 导水裂隙带; 层次分析法; 权重; 模糊聚类分析

中图分类号 TD 353 文献标志码 A DOI 10.13545/j.cnki.jmse.2015.02.006

## Study on the height of water flowing fractured zone based on analytic hierarchy process and fuzzy clustering analysis method

YANG Guoyong<sup>1</sup>, CHEN Chao<sup>2</sup>, GAO Shulin<sup>3</sup>, FENG Bo<sup>3</sup>

(1. School of Resource and Earth Science, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;  
2. Shanxi Tiandi Wangpo Mining Co Ltd, Jincheng, Shanxi 048021, China;  
3. Xin'an Coal Mine, Zaozhuang Mining Group, Weishan, Shandong 277642, China)

**Abstract** Based on the analysis of the factors influencing the height of water flowing fractured zone of roof, mining thickness, mining depth, and working face length, compressive strength of rock and characteristics of rock assemblages have been studied and the corresponding influence indexes have been quantified. Then the weight of the factors has been studied through the analytic hierarchy process and the height of fractured zone has been clustered by the fuzzy clustering analysis method. The result of the study of 10 working face data shows that the mining height is just one of the main factors influencing the height of water flowing fractured zone, with several other factors having an effect on it as well. The research results basically equal the empirical values and measured values. So it is a reasonable study method through which the height of water flowing fractured zone of coal seam roof can be predicted for coal mine.

**Key words** water flowing fractured zone; analytic hierarchy process; weight; fuzzy clustering analysis

收稿日期: 2013-09-10

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 杨国勇(1966—), 男, 山东省荣成市人, 副教授, 从事矿井水文地质、水文与水资源工程方面的研究。

E-mail: yanggy1010@126.com

Tel: 0516-83591019

煤矿开采过程中,在矿山压力作用下引起顶板覆岩发生显著运动,造成覆岩的破坏,产生离层裂隙或垂直张裂隙,甚者断裂,这些裂隙和断裂很可能沟通顶板含水层形成人工导水通道,增加矿井涌水量甚至引发顶板突水事故,造成严重的人员及经济损失,所以开展对煤层顶板裂隙带发育高度的研究对煤矿的安全生产具有重大的意义<sup>[1]</sup>。煤矿在预测煤层顶板导水裂隙带发育高度中,目前主要采用的是《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》给出的经验公式<sup>[2]</sup>,此公式仅考虑了开采厚度一个影响因素;但大量的生产实践证明,影响煤层顶板导水裂隙带发育高度因素是多方面的,只考虑一个影响因素,预测的准确性是比较低的,生产实践中也证明了这一点。施龙青教授考虑了多方面的因素对大采深条件下导水裂隙带发育高度进行了研究,对导水裂隙带发育高度的研究工作起到了很大的推动作用。一些煤矿工作者在实际工作中往往是采用已采工作面的导水裂隙带发育高度实测值来预测新工作面导水裂隙带发育高度值,当某些影响因素改变了,有的会和预测值相近,有的却会和预测值产生很大的偏差,所以这就需要在多因素条件下开展对影响因素权重值的研究,并且对各个工作面导水裂隙带发育高度进行合理的聚类分析,克服煤矿工作中的主观性。针对这一思路,本文运用层次分析与模糊聚类分析法对导水裂隙带发育高度开展研究。

## 1 研究基础

### 1.1 理论基础

#### 1.1.1 层次分析法

层次分析法(AHP)是20世纪70年代由美国运筹学家Santy提出的,经过近半个世纪的发展已经发展成为一种比较成熟的解决多目标的复杂问题的有效方法<sup>[3]</sup>。它的基本原理是对评价系统的各种要素分解成目标层、中间层和决策层,逐层分析形成一个从上到下的递阶的层次关系,但必须注意遵循各因素之间的相对独立性和可操作性原则。应用层次分析法分析问题一般经过以下4个步骤:

1) 建立层次结构模型。将决策的目标、考虑的因素和决策对象按它们之间的相互关系分为目标层、中间层和决策层,同一层的因素从属于上一层因素的同时又支配下一层因素。

2) 构建判断矩阵。在确定各层次各因素之间的权重时,如果只是定性的结果,则很难被别人接受;

因此采用一致矩阵法<sup>[4]</sup>,将因素两两相互比较而不是全部放在一起比较,采用相对尺度,以尽可能减少性质不同的因素相互比较的困难,提高准确度。

3) 层次单排序及一致性检验。所谓层次单排序是指,对于上一层某因素而言,本层次各因素的重要性排序。即对于矩阵 $A$ 计算满足 $AW=\lambda_{\max}W$ 的特征根与特征向量,式中 $\lambda_{\max}$ 为矩阵 $A$ 的最大特征根, $W$ 为对应于 $\lambda_{\max}$ 的正规化的特征向量, $W$ 的分量 $\omega_i$ 即是相应元素的权值。判断矩阵通常是不一致的,但是为了能用它的对应于特征根的特征向量作为被比较因素的权重,其不一致程度应在容许的范围内,对矩阵进行一致性检验,采用式(1):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

式中:  $CR$  为一致性比率,当  $CR < 0.1$  时认为不一致程度在容许的范围内,而

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

式中:  $CI$  为一致性特征数( $CI=0$  时  $A$  一致,  $CI$  接近于零有满意的一致性,  $CI$  越大,不一致性越严重);  $n$  为成对比较的因子个数。

$RI$  为随机一致性指标,其值由表1确定。

表1 随机一致性指标  $RI$   
Table 1 Random consistency index  $RI$

$n$	1	2	3	4	5	6
$RI$	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24
$n$	7	8	9	10	11	
$RI$	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	

4) 层次总排序及一致性检验。原理同层次单排序及一致性检验,利用式(3)进行总排序一致性检验。

$$CR = \frac{a_1 CI_1 + a_2 CI_2 + \dots + a_m CI_m}{a_1 RI_1 + a_2 RI_2 + \dots + a_m RI_m} = \frac{\sum_{i=1}^n CI_i a_i}{\sum_{i=1}^n RI_i a_i} \quad (3)$$

$CR < 0.1$  则可按照总排序权向量表示的结果进行决策,否则需要重新考虑模型或重新构造那些一致性比率  $CR$  较大的成对比较矩阵。

#### 1.1.2 模糊聚类分析

在工程技术等领域,常常需要对某些指标按照一定的标准进行分类处理的数学方法统称为聚类分析,它是多元统计“物以类聚”的一种分类方法;然而在工程技术中许多事物类与类之间并没有清晰的划分边界而具有模糊性,应用模糊数学的方法

进行聚类分析称为模糊聚类分析。此方法在矿业工程领域得到了越来越广泛的应用<sup>[5-6]</sup>。模糊聚类分析方法一般分为 3 个步骤：① 数据的标准化处理；② 建立模糊相似矩阵；③ 模糊聚类<sup>[7]</sup>。

1) 数据的标准化处理。设论域  $U=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  为被分类对象，每个对象又有  $m$  个指标表示其性状，即  $x_i=\{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}(i=1, 2, \dots, n)$ ，于是，得到原始数据矩阵为

$$X_0 = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix}$$

式中  $x_{nm}$  表示第  $n$  个分类对象的第  $m$  个指标的原始数据。

在实际问题中，不同数据一般有不同的量纲，为了使不同的量纲也能进行比较，通常需要对数据进行适当的变换将数据压缩到区间 $[0, 1]$ ，通常利用平移·标准差变换(式 4)、平移·极差变换(式 5)、对数变换等方法进行数据标准化。

$$x'_{ik} = \frac{x_{ik} - \bar{x}_k}{s_k} \quad (i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

式中： $\bar{x}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ik}$ ， $s_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}$ 。

$$x''_{ik} = \frac{x'_{ik} - \min_{1 \leq i \leq n} \{x'_{ik}\}}{\max_{1 \leq i \leq n} \{x'_{ik}\} - \min_{1 \leq i \leq n} \{x'_{ik}\}}, \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

2) 建立模糊相似矩阵。依照传统聚类方法确定相似系数，建立模糊相似矩阵表征  $x_i$  与  $x_j$  的相似程度。确定  $r_{ij}=R(x_i, x_j)$  的方法主要借用传统聚类的相似系数法、距离法以及其他方法。由于方法较多，在此仅简单介绍相似系数法中的最大最小法(式 6)，实际应用中具体用什么方法，可根据问题的性质，选取合理的方法进行计算。

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (x_{ik} \wedge x_{jk})}{\sum_{k=1}^m (x_{ik} \vee x_{jk})} \quad (6)$$

3) 模糊聚类。所谓聚类，就是根据模糊矩阵将所研究的对象进行分类。对于不同的置信水平  $\lambda \in [0, 1]$ ，可以得到不同的分类结果，常用的处理方法是传递闭包法，即将建立的模糊相似矩阵改造成模糊等价矩阵。用平方法求模糊相似矩阵的传递闭包，从  $n$  阶模糊相似矩阵  $R$  出发依次求平方： $R \rightarrow R^2 \rightarrow R^4 \rightarrow \dots$ ，直到  $R^{2k} = R^{2k+1}$  为止，则  $R^{2k}$  称为  $R$  的传递闭包矩阵，即模糊等价矩阵。然后确定合理

的  $\lambda$  截矩阵，对研究对象进行分类。

## 1.2 研究矿井概况

新安煤矿地处滕北煤田西南部，矿井位于滕县背斜的北翼及北羊庄向斜的南翼，基本为一倾向北西的单斜构造。2001 年投产，目前主采山西组煤层，井田中部沉积 2 煤层，下部为 3<sub>上</sub>(平均厚度 4.37 m)、3<sub>下</sub>(平均厚度 2.33 m)煤层。3<sub>上</sub>、3<sub>下</sub>煤层在井田中部及东南部合并成一层即 3 煤(平均厚度 8.02 m)，大部分地区分叉成 3<sub>上</sub>、3<sub>下</sub>两层煤层。上侏罗统砂砾岩岩溶裂隙含水层下距 3 煤顶板平均 50 m，是影响 3 煤开采的直接充水含水层，当采动形成导水裂隙带与其发生联系时，很容易发生突水事故。

## 2 应用 AHP 法确定矿井顶板导水裂隙带发育高度影响因素权重

### 2.1 建立层次结构模型

研究表明影响矿井顶板导水裂隙带发育高度的影响因素是多方面的，结合研究矿井实际情况，主要考虑以下几个方面的影响因素：

1) 开采厚度：开采厚度决定于煤层单层或分层开采的采高，可人为控制，开采厚度越大，形成的采空区越大，顶板受矿山压力作用产生塑性区的范围越大，留给顶板岩层冒落的空间也就越大，因此会造成冒裂带高度的增大。

2) 开采深度：根据施龙青教授的研究成果，大采深条件下导水裂隙带发育高度与浅部煤层是不同的，它们是一个正比关系，即开采深度越深，导水裂隙带越发育。

3) 工作面斜长：工作面斜长和采厚一样，属于开采面积大小对导水裂隙带影响的指标，也属于人为可控因素。工作面斜长的变化影响着控顶面积、基本顶垮落步距的变化，工作面斜长越小，对顶板岩层垮落的抵抗能力越强。

4) 岩石力学性质：岩石力学性质包括变形性质和破坏性质。岩层的破坏性质主要是指岩层的力学强度，其中起主要作用的是岩层的抗压强度。采空区形成后岩层的抗压强度直接影响到岩层的破坏程度，抗压强度越大，越不会导致自身被破坏，越不利于导水裂隙带的发育。岩石在受到扰动影响后，硬度较大的脆性岩体易于产生导水的裂隙带；而软弱的塑性岩体，以塑性变形为主，不易产生导水的裂隙带，将影响岩层断裂的贯通度。所以本文用顶板岩层的岩性组合特征对岩石的变形性质进行量化。不同的煤层顶板岩石组合类型，其开采

后将产生不同的破坏强度和离层裂隙。煤系地层岩石可分为硬岩和软岩。据经验显示，按照产生导高裂隙带由大到小的顺序，顶板岩石组合排序为：硬岩-硬岩型、软岩-硬岩型、硬岩-软岩型、软岩-软岩型<sup>[8]</sup>，对指标进行量化依次取值为 0.8，0.6，0.4，0.2<sup>[9]</sup>。

5) 地质构造：在有断裂构造破坏的地区，当断裂全部位于正常的导水裂隙带之内，只会加剧岩石的破碎程度，对裂隙带的发育高度不会造成明显变化；但当断裂局部位于裂隙带发育正常高度以外，很可能会扩大导水裂隙带的发育高度。本次研究根据所需选取的工作面都不存在断裂构造的影响。

6) 煤层的赋存状态：主要是指煤层的倾角( $\alpha$ )，根据倾角大小可划分为水平-缓倾斜( $\alpha \leq 35^\circ$ )、中倾斜( $35^\circ < \alpha \leq 54^\circ$ )、急倾斜( $\alpha \geq 55^\circ$ )，它对裂隙带破坏高度的影响也是十分显著的。本次研究矿井煤层倾角一般较小( $\alpha \leq 9^\circ$ )，对导水裂隙带的发育高度及其形态的变化影响不大，可以不予考虑。

综合以上对影响因素的分析，建立的层次结构模型见图 1。

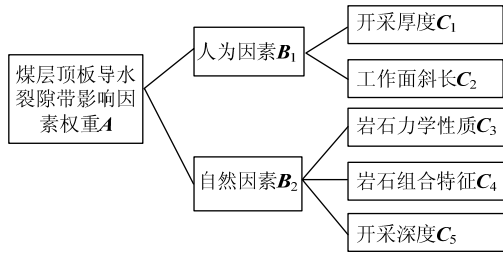


图 1 煤层顶板导水裂隙带影响因素的层次模型  
Fig.1 The layer model of factors influencing the water flowing fracture zone

2.2 构造判断矩阵

依据图 1，通过采用 1~9 及其倒数的标度法，两两因素进行比较，构造各层次的判别矩阵，判断矩阵元素值都是根据多位专家对指标的评价意见而确定的。首先构建 **A-B** 判断矩阵(见表 2)，再分类构建 **B-C** 判断矩阵(表 3，4)，最后由得出的 **A-B** 权重值  $X$ 、**B-C** 权重值  $Y$ ，列出各因素 **C** 对目标层 **A** 的权重  $Z$ (表 5)。

表 2 判断矩阵 **A-B** 及其特征向量  
Table 2 Judgment matrix **A**, **B** and its eigenvector

<b>A</b>	<b>B<sub>1</sub></b>	<b>B<sub>2</sub></b>	$X$
<b>B<sub>1</sub></b>	1	3	0.75
<b>B<sub>2</sub></b>	1/3	1	0.25

$\lambda_{\max}=2$

表 3 判断矩阵 **B<sub>1</sub>-C<sub>i</sub>** 及其特征向量  
Table 3 Judgment matrix **B<sub>1</sub>**, **C<sub>i</sub>** and its eigenvector

<b>B<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>2</sub></b>	$Y(B_1/C_i)$
<b>C<sub>1</sub></b>	1	4	0.8
<b>C<sub>2</sub></b>	1/4	1	0.2

$\lambda_{\max}=2$

表 4 判断矩阵 **B<sub>2</sub>-C<sub>i</sub>** 及其特征向量  
Table 4 Judgment matrix **B<sub>2</sub>**, **C<sub>i</sub>** and its eigenvector

<b>B<sub>2</sub></b>	<b>C<sub>3</sub></b>	<b>C<sub>4</sub></b>	<b>C<sub>5</sub></b>	$Y(B_2/C_i)$
<b>C<sub>3</sub></b>	1	2	9	0.606
<b>C<sub>4</sub></b>	1/2	1	5	0.328
<b>C<sub>5</sub></b>	1/9	1/5	1	0.066

$\lambda_{\max}=3.003$

表 5 各因素对总目标层的权重  
Table 5 The weight of each factor to total target layer

<b>A/C<sub>i</sub></b>	<b>B<sub>1</sub>/0.75</b>	<b>B<sub>2</sub>/0.25</b>	$Z$	总排序
<b>C<sub>1</sub></b>	0.8	—	0.6	1
<b>C<sub>2</sub></b>	0.2	—	0.15	3
<b>C<sub>3</sub></b>	—	0.606	0.152	2
<b>C<sub>4</sub></b>	—	0.328	0.082	4
<b>C<sub>5</sub></b>	—	0.066	0.016	5

2.3 一致性检验

首先是对单排序一致性进行检验，对于一阶、二阶矩阵总是一致的，所以只需对 **B-C** 判断矩阵进行一致性检验：

$$\lambda_{\max} = 3.003, \quad CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3.003 - 3}{3 - 1} = 0.0015, \\ RI = 0.58, \quad CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0015}{0.58} = 0.0026 < 0.1$$

不一致程度在允许的范围内，符合一致性检验要求。

接下来对总排序一致性进行检验：

$$CR = \frac{\sum_{i=1}^n CI_i Y_i}{\sum_{i=1}^n RI_i Y_i} = 0.0026 < 0.1$$

由此可知层次总排序通过一致性检验，从而确定影响煤层顶板导水裂隙带发育的因素权重值(见表 6)。

表 6 影响煤层顶板导水裂隙带发育高度因素的权重值  
Table 6 The weighting values of factors affecting the height of water flowing fractured zone

影响因素	开采厚度	开采深度	工作面斜长	岩石力学性质	岩石组合特征
权重值	0.6	0.016	0.15	0.152	0.082

3 应用模糊聚类分析方法对工作面导水裂隙带发育高度情况进行聚类

本次研究收集了新安煤矿 10 个工作面对顶板导水裂隙带发育高度造成影响的因素量化值,见表 7。

表 7 研究矿井地质参数采集统计表  
Table 7 Table of mine geological parameters gathering and statistics

工作面	开采厚度/ m	开采深度/ m	工作面斜长/ m	煤层倾角/ (°)	岩石力学性质/ MPa	岩石组合特征	开采情况
3107	9	264	130	6	85.73	0.4	已采
3111	9	339	182	9	92.37	0.6	已采
3 ± 201	4	381	223	5	76.74	0.6	已采
3 ± 203	4	437	224	6	82.86	0.6	已采
3109	9	317	166	6	90.78	0.6	已采
3 ± 205	4	452	266	5	80.24	0.6	已采
3302	7	483	242	8	83.77	0.4	已采
3304	7.8	520	212	8	86.26	0.8	正采
3 ± 301	3.85	473	204	6	110.4	0.8	待采
3119	8.4	309	252	8	97.36	0.4	待采

本文采用模糊聚类分析法对不同工作面的导水裂隙带发育高度进行分类。

初始矩阵为

$$X_0 = \begin{bmatrix} 9 & 264 & 130 & 6 & 85.73 & 0.4 \\ 9 & 339 & 182 & 9 & 92.37 & 0.6 \\ 4 & 381 & 223 & 5 & 76.74 & 0.6 \\ 4 & 437 & 224 & 6 & 82.86 & 0.6 \\ 9 & 317 & 166 & 6 & 90.78 & 0.6 \\ 4 & 452 & 266 & 5 & 80.24 & 0.6 \\ 7 & 483 & 242 & 8 & 83.77 & 0.4 \\ 7.8 & 520 & 212 & 8 & 86.26 & 0.8 \\ 3.85 & 473 & 204 & 6 & 110.4 & 0.8 \\ 8.4 & 309 & 252 & 8 & 97.36 & 0.4 \end{bmatrix}$$

1) 对数据进行规格化:本次采用平移标准差变换法(式 4)进行数据的规格化。

经过变换后,每个变量的均值为 0,标准差为 1,且消除了量纲的影响<sup>[10]</sup>。但是,再用得到的  $x'_{ik}$  还不一定在区间[0, 1]上,在经过平移极差变换(式 5),显然有  $0 \leq x''_{ik} \leq 1$ ,而且也消除了量纲的影响,得到  $X^*$ 。

$$X^* = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0 & 0 & 0.2500 & 0.2671 & 0 \\ 1.0000 & 0.2930 & 0.3824 & 1.0000 & 0.4643 & 0.5000 \\ 0.0291 & 0.4570 & 0.6838 & 0 & 0 & 0.5000 \\ 0.0291 & 0.6758 & 0.6912 & 0.2500 & 0.1818 & 0.5000 \\ 1.0000 & 0.2070 & 0.2647 & 0.2500 & 0.4171 & 0.5000 \\ 0.0291 & 0.7344 & 1.0000 & 0 & 0.1040 & 0.5000 \\ 0.6117 & 0.8555 & 0.8235 & 0.7500 & 0.2089 & 0 \\ 0.7670 & 1.0000 & 0.6029 & 0.7500 & 0.2828 & 1.0000 \\ 0 & 0.8164 & 0.5441 & 0.2500 & 1.0000 & 1.0000 \\ 0.8835 & 0.1758 & 0.8971 & 0.7500 & 0.6126 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.4168 & 0.0092 & 0.1362 & 0.5749 & 0.0355 & 0.2896 & 0.2770 & 0.1122 & 0.4077 \\ 0.4168 & 1.0000 & 0.2934 & 0.3778 & 0.7250 & 0.2785 & 0.4837 & 0.5871 & 0.3525 & 0.6173 \\ 0.0092 & 0.2934 & 1.0000 & 0.7174 & 0.3026 & 0.7054 & 0.3120 & 0.3544 & 0.3972 & 0.2168 \\ 0.1362 & 0.3778 & 0.7174 & 1.0000 & 0.4054 & 0.7421 & 0.4875 & 0.4987 & 0.5682 & 0.3075 \\ 0.5749 & 0.7250 & 0.3026 & 0.4054 & 1.0000 & 0.2832 & 0.3549 & 0.4762 & 0.3555 & 0.5020 \\ 0.0355 & 0.2785 & 0.7054 & 0.7421 & 0.2832 & 1.0000 & 0.4307 & 0.4105 & 0.4596 & 0.2692 \\ 0.2896 & 0.4837 & 0.3120 & 0.4875 & 0.3549 & 0.4307 & 1.0000 & 0.6551 & 0.3609 & 0.6427 \\ 0.2770 & 0.5871 & 0.3544 & 0.4987 & 0.4762 & 0.4105 & 0.6551 & 1.0000 & 0.5651 & 0.5014 \\ 0.1122 & 0.3525 & 0.3972 & 0.5682 & 0.3555 & 0.4596 & 0.3609 & 0.5651 & 1.0000 & 0.2960 \\ 0.4077 & 0.6173 & 0.2168 & 0.3075 & 0.5020 & 0.2692 & 0.6427 & 0.5014 & 0.2960 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

- 2) 构造模糊相似矩阵:采用最大最小法(式 6)来构造相似矩阵  $R=(r_{ij})_{10 \times 10}$ 。
- 3) 利用平方自合成方法求传递闭包  $t(R)$ , 依次计算  $R^2, R^4, R^8, R^{16}$ , 由于  $R^8=R^{16}$ , 所以  $t(R)=R^8$ ,

$$R^8 = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.5749 & 0.5651 & 0.5651 & 0.5749 & 0.5651 & 0.5749 & 0.5749 & 0.5651 & 0.5749 \\ 0.5749 & 1.0000 & 0.5651 & 0.5651 & 0.7250 & 0.5651 & 0.6173 & 0.6173 & 0.5651 & 0.6173 \\ 0.5651 & 0.5651 & 1.0000 & 0.7174 & 0.5651 & 0.7174 & 0.5651 & 0.5651 & 0.5682 & 0.5651 \\ 0.5651 & 0.5651 & 0.7174 & 1.0000 & 0.5651 & 0.7421 & 0.5651 & 0.5651 & 0.5682 & 0.5651 \\ 0.5749 & 0.7250 & 0.5651 & 0.5651 & 1.0000 & 0.5651 & 0.6173 & 0.6173 & 0.5651 & 0.6173 \\ 0.5651 & 0.5651 & 0.7174 & 0.7421 & 0.5651 & 1.0000 & 0.5651 & 0.5651 & 0.5682 & 0.5651 \\ 0.5749 & 0.6173 & 0.5651 & 0.5651 & 0.6173 & 0.5651 & 1.0000 & 0.6551 & 0.5651 & 0.6427 \\ 0.5749 & 0.6173 & 0.5651 & 0.5651 & 0.6173 & 0.5651 & 0.6551 & 1.0000 & 0.5651 & 0.6427 \\ 0.5651 & 0.5651 & 0.5682 & 0.5682 & 0.5651 & 0.5682 & 0.5651 & 0.5651 & 1.0000 & 0.5651 \\ 0.5749 & 0.6173 & 0.5651 & 0.5651 & 0.6173 & 0.5651 & 0.6427 & 0.6427 & 0.5651 & 1.0000 \end{bmatrix} = R^{16}$$

4) 最佳阈值的确定: 在模糊聚类分析中对于各个不同的置信水平  $\lambda \in [0, 1]$  上, 可以得到不同的分类, 令  $\lambda$  由 1 降至 0, 写出  $R_\lambda$  分类元素  $u_i$  和  $u_j$  归同一类的条件是,  $R_\lambda = (u_i, u_j) (i, j=1, 2, 3, \dots, 10)$ 。把  $t(R)$  中的元素从大到小的编排如下:  $1 > 0.7421 > 0.7250 > 0.7174 > 0.6651 > 0.6427 > 0.6173 > 0.5749 > 0.5682 > 0.5651$ , 取不同的阈值可以进行分类(图 2)。根据矿山生产的实际情况, 当  $\lambda=0.6173$  时, 导水裂隙带发育高度分类符合实际情况, 分为 4 类: 一类( $x_1$ ), 二类( $x_2, x_5, x_7, x_8, x_{10}$ ), 三类( $x_3, x_4, x_6$ ), 四类( $x_9$ )。从采集到的数据可以看出 3111, 3109, 3302, 3304, 3119 这 5 个工作面( $x_2, x_5, x_7, x_8, x_{10}$ )开采厚度相同, 3<sub>上</sub>201, 3<sub>上</sub>203, 3<sub>上</sub>205 这 3 个工作面( $x_3, x_4, x_6$ )开采厚度也一致。这 2 种分类说明了开采厚度是影响导水裂隙带高度发育的主要因素。3107 工作面( $x_1$ )在开采厚度与其他工作面相同的条件下, 开采深度较浅、工作面斜长较短, 与其他工作面有明显的不同; 3<sub>上</sub>301 工作面( $x_9$ )在开采厚度也与其他工作面相似的条件, 岩石抗压强度与岩层的组合特征明显区别于其他工作面。这 2 个工作面被单独分类说明, 开采厚度不是影响导水裂隙带发育的唯一影响因素。通过聚类我们可以预测正在生产的 3304 工作面和待采的 3119 工作面导水裂隙带发育情况应该和已采的 3109(有实测值)等工作面的发育高度情况相似, 可以利用 3109 工作面的实测值作为这 2 个工作面的预测值; 而针对待采的 3301 工作面, 矿方则不能利用其他工作面的导高裂隙带的发育情况来预测, 必须对 3301 工作面开展科学的合理的导水裂隙带发育高度预测研究。从聚类的结果可以看出, 采厚对导水裂隙带的高度发育起到的作用, 其他因素也起到一定的作用, 这与前文层次分析法预测的权重值分布相吻合。

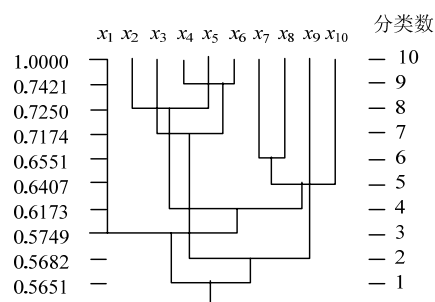


图2 动态聚类图

Fig.2 Figure of dynastic fuzzy clustering

## 4 结论

1) 根据影响因素权重的研究结果和聚类结果, 可以看出开采厚度的变化对导水裂隙带高度的发育起到非常重要的作用, 这与经验所得结果相似; 但是它并不是影响导水裂隙带发育高度的唯一因素, 开采深度、工作面斜长、岩石力学性质也会影响导水裂隙带高度的发育。

2) 运用模糊聚类分析法对不同工作面的导水裂隙带发育高度进行聚类, 研究结果与实际情况相似, 而且对聚类情况产生影响的主要因素与 AHP 所确定的权重也基本吻合, 说明了 2 种方法是比较合理的。2 种方法的结合为煤矿生产中预测工作面导水裂隙带发育高度提供了一种新的方法和途径, 在有工作面导水裂隙带发育高度实测值的情况下, 这种结合法具有一定的实用性。

3) 对一些构造复杂的和急倾斜煤层, 笔者未能利用此方法进行深度的研究, 此种预测方法是否适用于此种条件, 情况未知, 还有待于在今后的研究工作中进一步证实。

## 参考文献:

- [1] 施龙青, 辛恒奇, 翟培合, 等. 大采深条件下导水裂隙带高度计算研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(1): 37-41.

- SHI Longqing, XIN Hengqi, ZHAI Peihe, et al. Calculating the height of water flowing fracture zone in deep mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(1): 37-41.
- [2] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
- [3] 张文泉, 俞海玲. 应用层次分析法确定矿井顶板涌水影响因素的权值[J]. 矿业安全与环保, 2006, 33(2): 50-52.
- ZHANG Wenquan, YU Hailing. The application of analytic hierarchy process to determine weights of affecting factors of mine roof water[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2006, 33(2): 50-52.
- [4] 范金志, 郭德勇, 张建国. 层次分析法确定煤与瓦斯突出影响因素的权重[J]. 矿业安全与环保, 2004, 31(3): 4-5.
- FAN Jinzhi, GUO Deyong, ZHANG Jianguo. Analytic hierarchy process determining weights of factors influencing coal and gas outburst[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2004, 31(3): 4-5.
- [5] 郭文兵, 刘义新, 李小双. 采动影响下建筑物损害程度的模糊聚类分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 288-292.
- GUO Wenbing, LIU Yixin, LI Xiaoshuang. Fuzzy clustering analysis of mining induced damages of buildings[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(3): 288-292.
- [6] 郑纲. 模糊聚类分析法预测顶板砂岩含水层突水点及突水量[J]. 煤矿安全, 2004(1): 24-25.
- ZHENG Gang. Fuzzy clustering analysis method of predicting water gushing point of aquifer of roof sandstones and water inflow[J]. Safety in Coal Mines, 2004(1): 24-25.
- [7] 高新波. 模糊聚类分析及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 37-46.
- [8] 杨贵. 综放开采导水裂隙带高度及预测方法研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2004.
- [9] 马亚杰, 武强, 章之燕, 等. 煤层开采顶板导水裂隙带高度预测研究[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(5): 59-62.
- MA Yajie, WU Qiang, ZHANG Zhiyan, et al. Research on prediction of water conducted fissure height in roof of coal mining seam[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(5): 59-62.
- [10] 涂敏. 运用模糊聚类法分析煤层顶板稳定性[J]. 矿山压力与顶板管理, 1995, 12(3/4): 171-173.
- TU Min. Using the method of Fuzzy clustering analysis of coal seam roof stability[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1995, 12(3/4): 171-173.

## 《采矿与安全工程学报》获第六届江苏省科技期刊金马奖

近日, 在江苏省科技期刊学会主办的第六届江苏科技期刊“金马奖”评选活动中, 《采矿与安全工程学报》荣获“精品期刊奖”和“创新团队奖”。

为贯彻江苏省科协关于“鼓励、支持各级学会规范设立专业科技奖和人才奖, 积极举荐和表彰专业科技人才”的指示精神, 江苏省科技期刊学会开展了第六届江苏省科技期刊“金马奖”评选活动, 共评出“精品期刊奖”20项、“特色期刊奖”20项、“活动策划奖”5项、“品牌传播奖”5项、“创新团队奖”16项。

《采矿与安全工程学报》是全国中文核心期刊、美国《工程索引》收录期刊、中国科技论文统计源期刊、中国精品科技期刊、RCCSE中国核心学术期刊、中国高校优秀科技期刊、《中国科技论文在线》优秀期刊, 被国内外多家数据库或文摘收录。