



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2401769

引用格式:于远祥,刘路远,贺恒炜,等.焦坪矿区巷道稳定性聚类分析及工程应用[J].科学技术与工程,2025,25(5):2034-2048.

Yu Yuanxiang, Liu Luyuan, He Hengwei, et al. Cluster analysis of roadway stability in Jiaoping mining area and engineering application[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(5): 2034-2048.

## 建筑科学

# 焦坪矿区巷道稳定性聚类分析及工程应用

于远祥<sup>1</sup>, 刘路远<sup>1\*</sup>, 贺恒炜<sup>2</sup>, 霍小泉<sup>3</sup>, 岳东<sup>3</sup>

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 西安 710054; 2. 西安市轨道交通集团有限公司, 西安 710018;  
3. 陕西陕煤铜川矿业有限公司, 铜川 727000)

**摘要** 针对目前煤矿巷道围岩支护方案及其参数设计的盲目性,为提高巷道围岩支护效果,满足矿井安全高效生产要求,以焦坪矿区为工程背景,选取顶板强度、煤帮强度、底板强度、基本顶来压当量、回采扰动、巷道埋深、护巷煤柱宽度、跨高比、顶高比以及最大水平主应力作为巷道稳定性主控指标,选取 16 条典型巷道及硐室作为样本,基于层次分析法确定了 10 个分类指标的权重。在此基础上,对样本巷道稳定性进行了聚类分析,依据 F-统计量法选取最优分类数,将样本巷道划分为非常稳定、稳定、基本稳定、不稳定和极不稳定 5 大类,进而构建了焦坪矿区巷道稳定性的聚类中心。最后,基于上述理论对玉华矿 2407 回风顺槽围岩稳定性进行了预测,并提出了针对性支护对策及其参数。结果表明,2407 回风顺槽稳定性分类结果符合现场工程实际,围岩变形控制效果良好,为工作面安全高效生产提供了有力保障。

**关键词** 煤矿巷道; 聚类分析; 稳定性分类; 支护对策; 工程应用

中图分类号 TU32; 文献标志码 A

## Cluster Analysis of Roadway Stability in Jiaoping Mining Area and Engineering Application

YU Yuan-xiang<sup>1</sup>, LIU Lu-yuan<sup>1\*</sup>, He Heng-wei<sup>2</sup>, HUO Xiao-quan<sup>3</sup>, YUE Dong<sup>3</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an Rail Transit Group Company Limited, Xi'an 710018, China; 3. Shaanxi Coal Tongchuan Mining Co., Ltd., Tongchuan 727000, China)

**[Abstract]** Aiming at the blindness of the current coal mine roadway surrounding rock support programme and its parameter design, in order to improve the effect of roadway surrounding rock support and meet the requirements of safe and efficient production of mines, taking the Jiaoping mining area as the engineering background, the roof strength, coal gang strength, bottom plate strength, the basic top comes to press the equivalent, mining disturbance, roadway buried depth, roadway protection coal pillar width, span height ratio, top height ratio and the maximum horizontal principal stress were selected as roadway stability master control indicators, and 16 typical roadways and chambers were selected as samples, and the weights of 10 classification indicators were determined based on the analytic hierarchy process. On this basis, the stability of the sample roadway was clustered and analyzed, and the optimal classification number was selected according to the F-statistic method to divide the sample roadway into five categories: very stable, stable, basically stable, unstable and extremely unstable, and then the cluster center of the stability of the mine roadway was constructed. Finally, based on the above theory, the stability of the surrounding rock in the 2407 return wind channel of Yuhua Mine was predicted, and the targeted support measures and parameters were proposed. The results show that the classification results of 2407 return wind channel roadway stability are in line with the actual field engineering, and the deformation control effect of surrounding rock is good, which provides a strong guarantee for the safe and efficient production of the working face.

**[Keywords]** coal mine roadways; cluster analysis; stability classification; supporting measures; engineering application

作为中国主要能源之一,煤炭的安全高效开采至关重要。在这一过程中,确保煤矿巷道的稳定性以及进行有效的支护设计是保障煤矿安全高效生

产的关键环节。煤矿巷道的稳定性分类和支护设计对于防范潜在的风险和确保工作环境的稳定性具有重要意义。长期以来,大量专家学者对巷道稳

收稿日期: 2024-03-13 修订日期: 2024-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(52074208)

第一作者: 于远祥(1976—),男,汉族,重庆人,博士,副教授。研究方向:围岩稳定性评价及其支护技术。E-mail:1374400919@qq.com。

\*通信作者: 刘路远(1999—),男,汉族,陕西渭南人,硕士研究生。研究方向:围岩稳定性评价及其支护技术。E-mail:1509282599@qq.com。

定性分类进行了深入研究。蒋金泉等<sup>[1]</sup>研究了反映跨采巷道具具体稳定性特征的方案和支护参数决策方法,以实现跨采巷道稳定性的定量预测;周保生等<sup>[2]</sup>应用模糊数学的方法对巷道围岩稳定性分类进行综合研究,将围岩稳定性划分为3个类别,并确定了各类别的聚类中心,使得分类结果更具可靠性;李洪等<sup>[3]</sup>以模糊聚类分析结果为基础,采用迭代自组织数据分析算法(iterative self organizing data analysis techniques algorithm, ISODATA)聚类分析法进行样本分类再优化,使得巷道分类更加符合实际情况;丁新启等<sup>[4]</sup>运用VB语言建立分类程序,从而对回采巷道围岩进行合理分类,并针对性地提出相应支护方案;魏锦平等<sup>[5]</sup>为简化模糊综合评判计算过程,采用VB编程设计人机友好交互界面进行运算,并预测出其稳定性类别、相应的支护形式参数以及围岩移近量;张志康等<sup>[6]</sup>通过基于模糊等价关系的聚类分析对围岩稳定性进行分类,提出相应支护对策,并制定出煤巷支护对策选择标准;杨战标<sup>[7]</sup>采用模糊聚类分析法将巷道围岩分为四类,并研发出用于巷道围岩分类和锚网支护设计程序,简化了模糊聚类计算过程,同时为巷道提供了合理的支护对策;樊百胜<sup>[8]</sup>分析了不同稳定类别围岩变形特征及控制技术,并确定各类煤巷的较优支护形式和参数,保证了煤巷的安全高效生产;李迎富<sup>[9]</sup>采用模糊聚类法对巷道围岩稳定性进行整体分类,再结合巷道顶底板与两帮围岩的岩性情况,进行巷道围岩次分类研究,提出适合深井回采巷道稳定性控制原则;郑学召等<sup>[10]</sup>应用模糊等价聚类分析合理选取各分类阈值,所得围岩稳定性类别为合理设计围岩支护方案及其参数提供理论依据;齐彪等<sup>[11]</sup>结合围岩松动圈分类和锚喷支护围岩分类方法,制定了围岩稳定性综合分类表和巷道支护方案选择标准,有效控制了巷道围岩的收敛变形;石永奎等<sup>[12]</sup>基于不同算法对围岩稳定性进行训练和预测,比较不同算法在稳定性分类预测上的适用性,提高了围岩稳定性分类的准确性;李健等<sup>[13]</sup>采用数值模拟软件对巷道围岩稳定性进行分析,并提出相应的支护方案及支护参数选取标准,在现场试验中取得了理想的控制效果;郭忠平等<sup>[14]</sup>采用巴顿岩体质量分类方法对围岩稳定性进行评价以及合理分类,选择合理开挖方法和支护形式,为支护设计、施工和管理提供了科学依据;杨仁树等<sup>[15]</sup>使用动态聚类分析法,基于模糊等价关系对霍州矿区的巷道围岩稳定性进行分类,并针对性提出各类巷道的合理支护对策,分类结果较为符合实际情况;高杰等<sup>[16]</sup>针对软岩巷道顶板掉块、片帮、底鼓等问题,运用多种研究

方法建立巷道围岩综合分类表,并提出巷道支护与修复加固技术方案,实践表明具有较好的工程应用价值;王茂盛等<sup>[17]</sup>针对围岩稳定性分类指标进行统计研究,并将模糊聚类分析与现场监测相结合,可有效指导围岩支护参数设计,保持巷道围岩变形量在可控范围内;王睿等<sup>[18]</sup>建立BP神经网络模型,并以岩体基本质量指标(BQ)分级法为基础对围岩进行分级,分类准确度较高;李美晨等<sup>[19]</sup>分析支护失效影响因素,构建围岩局部失稳监控指标体系,进行失稳垮冒风险等级分类,并得出巷道围岩差异性支护对策;焦建康等<sup>[20]</sup>针对巷道围岩稳定性进行量化评价,提出巷道围岩分级支护形式和支护参数,保证巷道掘进和回采期间的稳定;董俊亮等<sup>[21]</sup>对岩层顶板稳定性进行分析与计算,并提出针对性的支护方案,有效地维护了巷道顶板稳定;马鑫民等<sup>[22]</sup>建立围岩稳定性分类数据库和预测模型,经模型计算神经网络和改进的支持向量机模型具有较高的预测准确性;程志斌等<sup>[23]</sup>采用理论分析对覆岩结构特征进行分类,提出了巷道顶板稳定性分类方法,并采用数值模拟方法对锚杆、锚索联合支护特征进行研究;马清水等<sup>[24]</sup>将模糊层次分析风险评判模型与灰色关联分析风险评判模型相融合,与现场工程对比分析并提出具有针对性的风险管控措施。

焦坪矿区工程地质条件复杂,巷道围岩分类管理难度大,支护形式单一,并且未曾系统性地开展围岩采样分析以及稳定性分类研究,现有的“一巷一策”“多巷一策”的支护方案及其参数设计存在一定的盲目性和不适应性,诸多巷道和硐室出现顶板塌落、两帮挤进及底板隆起等现象。因此,现以焦坪矿区为工程背景,在搜集巷道工程地质资料及煤岩样强度测试的基础上,建立焦坪矿区巷道稳定性分析样本及其参数。运用模糊聚类分析法构建焦坪矿区巷道稳定性聚类中心,可对新掘巷道围岩的稳定性进行合理预测;以分类结果为基础,通过对焦坪矿区不同类别巷道变形破坏特征进行研究,即可针对性地提出适用于该矿区巷道的支护对策,以确保工作面的安全高效生产。

## 1 工程概况

焦坪矿区包括玉华矿、柴家沟矿、下石节矿等,矿区位于鄂尔多斯盆地东南缘,矿区南北长26.5 km,东西宽3.84 km,含煤面积103.1 km<sup>2</sup>,4-2号煤层为主采煤层,其厚度一般为8~12 m,埋深一般为400~600 m,属于低变质长焰煤。该矿区地质构造复杂,小断层、小褶曲发育,沿煤层顶板层滑构造发育,导致煤层厚度不稳定,煤层厚度发生急剧变化,主要巷道及硐

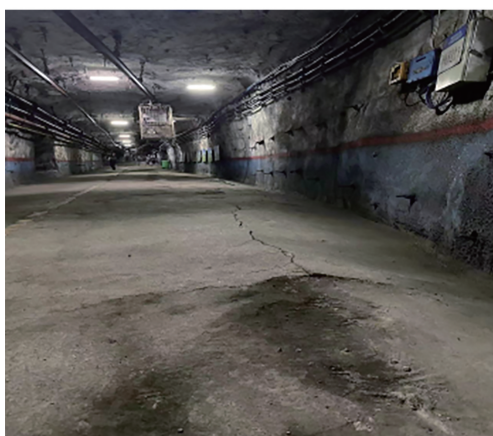
室的顶板为粉砂岩及粉砂质泥岩,较坚硬,垂直裂隙发育,部分顶板为炭质泥岩,较松软,随采动冒落;帮部为煤层,强度低,较破碎;直接底为炭质泥岩,较松软,遇水膨胀,老底为石英砂岩,岩性致密坚硬。由于工程地质条件复杂,并受煤层上覆砂岩裂隙水的影响,加之巷道支护设计的单一性和盲目性,导致部分巷道及硐室围岩变形破坏极为严重,主要表现为顶板开裂冒落、两帮鼓出及底板隆起,如图1所示。



(a)玉华矿巷道破坏



(b)柴家沟矿巷道破坏



(c)下石节矿巷道破坏

图1 焦坪矿区巷道围岩变形破坏现状

Fig. 1 The current situation of deformation and damage of the surrounding rock of the roadway in Jiaoping mining area

## 2 焦坪矿区巷道稳定性指标体系构建

### 2.1 巷道稳定性分类指标的选取

巷道稳定性分类结果的准确性与可靠性在很大程度上取决于围岩稳定性指标的合理选取。根据工程地质因素和采矿技术因素,通过对焦坪矿区巷道变形破坏现状的调查分析,依据明确性、可分性、重要性、独立性和易获取性分类指标提取原则<sup>[7]</sup>,选取顶板强度 $\sigma_r$ 、煤帮强度 $\sigma_w$ 、底板强度 $\sigma_f$ 、基本顶来压当量 $P_e$ 、巷道理深 $H$ 、护巷煤柱宽度 $X$ 、回采扰动程度 $D$ 、跨高比 $L$ 、顶高比 $N$ 以及最大水平主应力 $\sigma_h$ 作为焦坪矿区巷道稳定性的指标体系。上述指标体系中基本顶来压当量计算公式<sup>[25]</sup>为

$$p_e = 241.3 \ln l_b + 52.6 h_m - 15.5 N \quad (1)$$

式(1)中: $l_b$ 为工作面来压步距,m; $h_m$ 为工作面采高,m; $N$ 为顶高比。

### 2.2 巷道稳定性分类指标权值的确定

在对巷道围岩稳定性进行分类时,各分类指标对稳定性的影响并不相同。因此,为了准确评估其稳定性,需要根据各指标在分类中的重要性给予不同的权值。层次分析法是一种能够将这种决策思维过程数量化、直观化、模型化的方法。该方法的实现过程主要包括以下3个步骤。

#### 步骤1 构建判别矩阵。

对巷道稳定性各影响指标的相对重要性进行判断,并将相互比较获得的度量指标进行定量化分析,用“非常”“较为”“同等”作为标度,各指标标度权重取值情况如表1所示。

通过对焦坪矿区样本巷道工程地质条件的现场调查,结合有关专家和现场技术人员的意见,对巷道稳定性的10个关键影响指标的相对重要程度进行比较分析,构建了焦坪矿区巷道稳定性影响指标的比较矩阵如表2所示。

通过巷道稳定性影响指标的比较矩阵可得最优传递矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

表1 各指标相对重要性权值

Table 1 The relative importance of each indicator

序号	指标重要性	$F(x, y)$
1	$x$ 比 $y$ 非常重要	-2
2	$x$ 比 $y$ 较为重要	-1
3	$x$ 与 $y$ 同等重要	0
4	$y$ 比 $x$ 较为重要	1
5	$y$ 比 $x$ 非常重要	2

表2 各影响指标比较矩阵

**Table 2 Comparison matrix of impact indicators**

因素	$\sigma_r$	$\sigma_w$	$\sigma_f$	$P_c$	$H$	$X$	$D$	$L$	$N$	$\sigma_h$
$\sigma_r$	0	2	2	-1	-2	-1	1	1	1	1
$\sigma_w$	-2	0	-1	-1	-2	-2	-2	-1	-1	1
$\sigma_f$	-2	1	0	-1	-2	-2	-2	-1	-1	1
$P_c$	1	1	1	0	-2	-2	-1	1	1	-1
$H$	2	2	2	2	0	-1	2	1	2	2
$X$	1	2	2	2	1	0	1	1	1	1
$D$	-1	2	2	1	-2	-1	0	1	1	1
$L$	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	0	1	-1
$N$	-1	1	1	-1	-2	-1	-1	-1	0	-1
$\sigma_h$	-1	-1	-1	1	-2	-1	-1	1	1	0

式(2)中:最优传递矩阵的任一元素计算公式为

$$r_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (a_{ik} + a_{kj}) \quad (3)$$

式(3)中: $n$ 为评价指标数量; $a_{ik}$ 为比较矩阵中第*i*行第*k*列权值; $a_{kj}$ 为比较矩阵中第*k*行第*j*列权值。

令

$$d_{ik} = \exp(r_{ik}) \quad (4)$$

例如

$$d_{12} = \exp(r_{12}) = \exp\left[\frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} (a_{1k} + a_{k2})\right] =$$

$$e^{1.5} = 4.4817。$$

同理可得,判别矩阵  $D$  如式(5)所示。

**步骤2** 计算指标权值可知,指标权值计算为在判别矩阵  $D$  中,令

$$\begin{cases} M_i = \prod_{j=1}^{10} d_{ij} \\ \bar{W}_i = \sqrt[10]{M_i} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: $M_i$ 为模糊变化算子; $\bar{W}_i$ 为模糊子集; $d_{ij}$ 为判别矩阵中第*i*行第*j*列的值。

由式(5)及式(6)可得巷道顶板强度权重为

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0000 & 4.4817 & 3.6693 & 1.6487 & 0.3679 & 0.4493 & 1.0000 & 2.0138 & 2.7183 & 2.2255 \\ 0.2231 & 1.0000 & 0.8187 & 0.3679 & 0.0821 & 0.1003 & 0.2231 & 0.4493 & 0.6065 & 0.4966 \\ 0.2725 & 1.2214 & 1.0000 & 0.4493 & 0.1003 & 0.1225 & 0.2725 & 0.5488 & 0.7408 & 0.6065 \\ 0.6065 & 2.7183 & 2.2255 & 1.0000 & 0.2231 & 0.2725 & 0.6065 & 1.2214 & 1.6487 & 1.3499 \\ 2.7183 & 12.1825 & 9.9742 & 4.4817 & 1.0000 & 1.2214 & 2.7183 & 5.4739 & 7.3891 & 6.0496 \\ 2.2255 & 9.9742 & 8.1662 & 3.6693 & 0.8187 & 1.0000 & 2.2255 & 4.4817 & 6.0496 & 4.9530 \\ 1.0000 & 4.4817 & 3.6693 & 1.6487 & 0.3679 & 0.4493 & 1.0000 & 2.0138 & 2.7183 & 2.2255 \\ 0.4966 & 2.2255 & 1.8221 & 0.8187 & 0.1827 & 0.2231 & 0.4966 & 1.0000 & 1.3499 & 1.1052 \\ 0.3679 & 1.6487 & 1.3499 & 0.6065 & 0.1353 & 0.1653 & 0.3679 & 0.7408 & 1.0000 & 0.8187 \\ 0.4493 & 2.0138 & 1.6487 & 0.7408 & 0.1653 & 0.2019 & 0.4493 & 0.9048 & 1.2214 & 1.0000 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \bar{W}_1 &= \sqrt[10]{d_{11}d_{12}\cdots d_{110}} \\ &= \sqrt[10]{1 \times 4.4817 \times \cdots \times 2.2255} = 1.492 \quad (7) \end{aligned}$$

同理,可得其余9个权重,则巷道稳定性因素的权重集为

$$W = \{1.492, 1.053, 0.398, 0.905, 4.055, 3.320, 1.492, 0.741, 0.559, 0.669\}^T \quad (8)$$

将式(8)数据归一化处理后可得各因素的指标权值如表3所示。

**步骤3** 权值分配检测。

根据一致性检验判断权值的合理性,最大特征值计算式<sup>[17]</sup>为

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(DW)_i}{W_i} \quad (9)$$

式(9)中: $n$ 为评价指标数量; $W$ 为各影响指标的权值; $D$ 为判别矩阵。

一致性指标  $CI$  的计算式为

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (10)$$

表3 各影响指标的权值

**Table 3 Weighting of impact indicators**

指标	权值	指标	权值
$\sigma_r$	0.10	$X$	0.23
$\sigma_w$	0.07	$D$	0.10
$\sigma_f$	0.03	$L$	0.05
$P_c$	0.06	$N$	0.04
$H$	0.27	$\sigma_h$	0.05

随机一次性比例为

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (11)$$

式(11)中: $RI$ 为平均一致性指标。

分类指标权值分配具体计算步骤如式(12)~式(15)所示。

$$DW = \begin{bmatrix} 1.000 0 & 4.481 7 & 3.669 3 & 1.648 7 & 0.367 9 & 0.449 3 & 1.000 0 & 2.013 8 & 2.718 3 & 2.225 5 \\ 0.223 1 & 1.000 0 & 0.818 7 & 0.367 9 & 0.082 1 & 0.100 3 & 0.223 1 & 0.449 3 & 0.606 5 & 0.496 6 \\ 0.272 5 & 1.221 4 & 1.000 0 & 0.449 3 & 0.100 3 & 0.122 5 & 0.272 5 & 0.548 8 & 0.740 8 & 0.606 5 \\ 0.606 5 & 2.718 3 & 2.225 5 & 1.000 0 & 0.223 1 & 0.272 5 & 0.606 5 & 1.221 4 & 1.648 7 & 1.349 9 \\ 2.718 3 & 12.182 5 & 9.974 2 & 4.481 7 & 1.000 0 & 1.221 4 & 2.718 3 & 5.473 9 & 7.389 1 & 6.049 6 \\ 2.225 5 & 9.974 2 & 8.166 2 & 3.669 3 & 0.818 7 & 1.000 0 & 2.225 5 & 4.481 7 & 6.049 6 & 4.953 0 \\ 1.000 0 & 4.481 7 & 3.669 3 & 1.648 7 & 0.367 9 & 0.449 3 & 1.000 0 & 2.013 8 & 2.718 3 & 2.225 5 \\ 0.496 6 & 2.225 5 & 1.822 1 & 0.818 7 & 0.182 7 & 0.223 1 & 0.496 6 & 1.000 0 & 1.349 9 & 1.105 2 \\ 0.367 9 & 1.648 7 & 1.349 9 & 0.606 5 & 0.135 3 & 0.165 3 & 0.367 9 & 0.740 8 & 1.000 0 & 0.818 7 \\ 0.449 3 & 2.013 8 & 1.648 7 & 0.740 8 & 0.165 3 & 0.201 9 & 0.449 3 & 0.904 8 & 1.221 4 & 1.000 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.10 \\ 0.07 \\ 0.03 \\ 0.06 \\ 0.27 \\ 0.23 \\ 0.10 \\ 0.05 \\ 0.04 \\ 0.05 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.246 1 \\ 0.278 0 \\ 0.339 6 \\ 0.755 8 \\ 3.387 2 \\ 2.773 2 \\ 1.246 1 \\ 0.618 8 \\ 0.458 4 \\ 0.559 9 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(DW)_i}{W_i} = \frac{1}{10} \left( \frac{1.246 1}{0.1} + \frac{0.278 0}{0.07} + \dots + \frac{0.559 9}{0.05} \right) \approx 11.244 7 \quad (13)$$

将  $\lambda_{\max} = 11.244 7$  和  $n = 10$  代入式(10)得

$$CI = \frac{11.244 7 - 10}{10 - 1} = 0.138 3 \quad (14)$$

由表4可知,当  $n = 10$  时,  $RI = 1.49$ 。将式(14)代入式(11)可得

$$CR = \frac{0.138 3}{1.49} = 0.092 8 \quad (15)$$

表4 平均随机一致性指标 RI 取值表<sup>[26]</sup>

Table 4 Average stochastic consistency indicator (RI) value table<sup>[26]</sup>

n	RI	n	RI	n	RI
1	0	6	1.26	11	1.52
2	0	7	1.36	12	1.54
3	0.52	8	1.41	13	1.56
4	0.89	9	1.46	14	1.58
5	1.12	10	1.49	15	1.59

表5 焦坪矿区巷道聚类分析样本及其参数

Table 5 Samples and their parameters analyzed by roadway clustering analysis in Jiaoping mining area

样本	$\sigma_r$ /MPa	$\sigma_w$ /MPa	$\sigma_f$ /MPa	$P_c$ /kPa	H/m	X/m	D	L	N	$\sigma_h$ /MPa
$U_1$	51.60	52.10	12.23	782	432	20.0	0.56	1.56	1.35	15.64
$U_2$	48.51	55.31	13.65	895	545	15.0	0.60	1.55	1.28	10.40
$U_3$	35.68	45.36	8.96	982	441	15.0	0.48	1.30	1.30	13.05
$U_4$	54.56	33.00	9.51	773	470	15.0	0.40	0.86	0.75	13.01
$U_5$	48.30	38.50	16.85	873	456	17.5	0.60	0.90	0.88	12.95
$U_6$	35.84	44.51	14.55	864	466	17.5	0.56	1.25	1.33	13.02
$U_7$	45.00	50.00	5.69	927	552	20.0	0.64	1.55	1.28	20.80
$U_8$	44.35	48.21	8.88	764	438	17.5	0.60	1.38	1.46	13.03
$U_9$	45.55	35.85	8.56	814	489	12.5	0.52	1.35	1.45	12.97
$U_{10}$	55.68	40.56	10.56	866	520	17.5	0.56	1.26	1.33	15.55
$U_{11}$	58.55	42.88	14.55	796	485	20.0	0.60	1.35	1.28	15.65
$U_{12}$	43.88	45.66	12.36	955	512	12.5	0.48	1.14	1.55	18.16
$U_{13}$	46.55	38.33	15.66	895	495	12.5	0.52	0.89	1.05	13.03
$U_{14}$	55.88	40.55	7.89	788	450	17.5	0.48	0.95	0.88	18.21
$U_{15}$	56.55	52.23	8.56	810	466	15.0	0.36	1.25	0.95	15.64
$U_{16}$	60.52	38.13	9.55	869	485	17.5	0.56	1.55	1.15	18.16

由式(15)可得  $CR = 0.092 8 < 0.1$ ,表明层次排序结果一致性较好,样本巷道稳定性影响指标权重分配合理。

### 3 焦坪矿区巷道稳定性模糊聚类分析

#### 3.1 构造模糊相似矩阵

##### 3.1.1 巷道聚类单元的统计

选取铜川焦坪矿区玉华矿 1416 工作面运输顺槽( $U_1$ )、回风顺槽( $U_2$ )、水仓( $U_3$ )、运顺联巷( $U_4$ )、回风联巷( $U_5$ );2404 工作面反风道( $U_6$ )、运输顺槽( $U_7$ )、回风顺槽( $U_8$ )、运顺联巷( $U_9$ );柴家沟煤矿 42221 工作面运输顺槽( $U_{10}$ )、回风顺槽( $U_{11}$ )、水仓( $U_{12}$ );42227 工作面反风道( $U_{13}$ )、运输顺槽( $U_{14}$ )、回风顺槽( $U_{15}$ )以及下石节矿 224 工作面运输顺槽( $U_{16}$ )共计 16 条巷道作为聚类单元。焦坪矿区样本巷道稳定性分析相关指标取值如表 5 所示。

##### 3.1.2 数据标准化

由于不同指标的量级往往存在较大差异性,若直接选取原始数据进行理论计算,将导致绝对值大

的指标发挥的作用被“放大”,而绝对值小的指标作用被“缩小”,计算结果与实际情况产生偏差。因此,对原始数据进行标准化处理,将数据压缩到[0,1]闭区间内是至关重要的一步。设某一聚类指标的原始数据为  $y$ ,其最大值为  $y_{\max}$ ,最小值为  $y_{\min}$ ,该指标标准化计算公式<sup>[10]</sup>为

$$x = \frac{y - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (16)$$

以围岩顶板强度为例,其最大值  $y_{\max} = 60.52$ ,最小值  $y_{\min} = 35.68$ ,则样本指标参数 51.6 标准化值为

$$x_{51.6} = \frac{51.60 - 35.68}{60.52 - 35.68} = 0.64 \quad (17)$$

将表 5 数据进行标准化处理,如表 6 所示。

### 3.1.3 数据标定

现在对 16 条巷道按 10 个指标进行分类。首先,建立所有围岩稳定性指标间相似程度的统计量,采用绝对值减数法进行计算,表达式为

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 1 - c \sum_{k=1}^{10} |x_{ik} - x_{jk}|, & i \neq j \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中: $c$ 为系数,其选取应满足  $0 \leq \gamma_{ij} \leq 1$ 。

令  $c = 0.1$ ,则有

$$\gamma_{21} = 1 - 0.1 [ |x_{21} - x_{11}| + |x_{22} - x_{12}| + \dots + |x_{210} - x_{110}| ] = 0.674$$

同理,可得其他指标间的相似程度统计量  $\gamma_{ij}$ ,并得到论域  $U$  上的对称模糊相似关系矩阵  $R = (\gamma_{ij})_{n \times n}$ ,如式(19)所示。

表 6 焦坪矿区巷道聚类分析样本及其标准化参数

Table 6 Cluster analysis of roadway samples and their standardized parameters in Jiaoping mining area

样本	$\sigma_r$ /MPa	$\sigma_w$ /MPa	$\sigma_t$ /MPa	$P_c$ /kPa	$H$ /m	$X$ /m	$D$	$L$	$N$	$\sigma_h$ /MPa
$U_1$	0.64	0.86	0.59	0.08	0.00	1.00	0.71	1.00	0.75	0.50
$U_2$	0.52	1.00	0.71	0.60	0.94	0.33	0.86	0.99	0.66	0.00
$U_3$	0.00	0.55	0.29	1.00	0.08	0.33	0.43	0.63	0.69	0.25
$U_4$	0.76	0.00	0.34	0.04	0.32	0.33	0.14	0.00	0.00	0.25
$U_5$	0.51	0.25	1.00	0.50	0.20	0.67	0.86	0.06	0.16	0.25
$U_6$	0.01	0.52	0.79	0.46	0.28	0.67	0.71	0.56	0.73	0.25
$U_7$	0.38	0.76	0.00	0.75	1.00	1.00	1.00	0.99	0.66	1.00
$U_8$	0.35	0.68	0.29	0.00	0.05	0.67	0.86	0.74	0.89	0.25
$U_9$	0.40	0.13	0.26	0.23	0.48	0.00	0.57	0.70	0.88	0.25
$U_{10}$	0.81	0.34	0.44	0.47	0.73	0.67	0.71	0.57	0.73	0.50
$U_{11}$	0.92	0.44	0.79	0.15	0.44	1.00	0.86	0.70	0.66	0.50
$U_{12}$	0.33	0.57	0.60	0.88	0.67	0.00	0.43	0.40	1.00	0.75
$U_{13}$	0.44	0.24	0.89	0.60	0.53	0.00	0.57	0.04	0.38	0.25
$U_{14}$	0.81	0.34	0.20	0.11	0.15	0.67	0.43	0.13	0.16	0.75
$U_{15}$	0.84	0.86	0.26	0.21	0.28	0.33	0.00	0.56	0.25	0.50
$U_{16}$	1.00	0.23	0.35	0.48	0.44	0.67	0.71	0.99	0.50	0.75

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.674 & 0.612 & 0.517 & 0.597 & 0.713 & 0.351 & 0.797 & 0.625 & 0.726 & 0.805 & 0.554 & 0.489 & 0.642 & 0.674 & 0.709 \\ 0.674 & 1 & 0.628 & 0.459 & 0.609 & 0.689 & 0.689 & 0.653 & 0.635 & 0.696 & 0.655 & 0.628 & 0.647 & 0.438 & 0.584 & 0.637 \\ 0.612 & 0.628 & 1 & 0.583 & 0.599 & 0.799 & 0.557 & 0.741 & 0.725 & 0.668 & 0.581 & 0.726 & 0.643 & 0.606 & 0.664 & 0.607 \\ 0.517 & 0.459 & 0.583 & 1 & 0.698 & 0.562 & 0.320 & 0.586 & 0.674 & 0.621 & 0.572 & 0.503 & 0.694 & 0.781 & 0.757 & 0.606 \\ 0.597 & 0.609 & 0.599 & 0.698 & 1 & 0.768 & 0.466 & 0.664 & 0.616 & 0.701 & 0.688 & 0.547 & 0.818 & 0.737 & 0.591 & 0.666 \\ 0.713 & 0.689 & 0.799 & 0.562 & 0.768 & 1 & 0.572 & 0.782 & 0.716 & 0.795 & 0.760 & 0.675 & 0.712 & 0.617 & 0.627 & 0.694 \\ 0.351 & 0.689 & 0.557 & 0.320 & 0.466 & 0.572 & 1 & 0.620 & 0.536 & 0.655 & 0.626 & 0.595 & 0.450 & 0.495 & 0.491 & 0.664 \\ 0.797 & 0.653 & 0.741 & 0.586 & 0.664 & 0.782 & 0.620 & 1 & 0.770 & 0.717 & 0.730 & 0.601 & 0.562 & 0.663 & 0.659 & 0.668 \\ 0.625 & 0.635 & 0.725 & 0.674 & 0.616 & 0.716 & 0.536 & 0.770 & 1 & 0.737 & 0.676 & 0.725 & 0.764 & 0.627 & 0.669 & 0.694 \\ 0.726 & 0.696 & 0.668 & 0.621 & 0.701 & 0.795 & 0.655 & 0.717 & 0.737 & 1 & 0.815 & 0.702 & 0.681 & 0.728 & 0.702 & 0.841 \\ 0.805 & 0.655 & 0.581 & 0.572 & 0.688 & 0.760 & 0.626 & 0.730 & 0.676 & 0.815 & 1 & 0.581 & 0.620 & 0.679 & 0.667 & 0.776 \\ 0.554 & 0.628 & 0.726 & 0.503 & 0.547 & 0.675 & 0.595 & 0.601 & 0.725 & 0.702 & 0.581 & 1 & 0.723 & 0.582 & 0.588 & 0.607 \\ 0.489 & 0.647 & 0.643 & 0.694 & 0.818 & 0.712 & 0.450 & 0.562 & 0.764 & 0.681 & 0.620 & 0.723 & 1 & 0.635 & 0.591 & 0.630 \\ 0.642 & 0.438 & 0.606 & 0.781 & 0.737 & 0.617 & 0.495 & 0.663 & 0.627 & 0.728 & 0.679 & 0.582 & 0.635 & 1 & 0.762 & 0.741 \\ 0.674 & 0.584 & 0.664 & 0.757 & 0.591 & 0.627 & 0.491 & 0.659 & 0.669 & 0.702 & 0.667 & 0.588 & 0.591 & 0.762 & 1 & 0.671 \\ 0.709 & 0.637 & 0.607 & 0.606 & 0.666 & 0.694 & 0.664 & 0.668 & 0.694 & 0.841 & 0.776 & 0.607 & 0.630 & 0.741 & 0.671 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

### 3.2 传递包法计算模糊等价矩阵

基于模糊等价关系的聚类分析, 聚类矩阵必须具备模糊等价特性, 即应满足 3 个基本条件<sup>[27]</sup>:

①自反性, 即  $\gamma_{ij} = 1 (i = j)$ ; ②对称性, 即  $\gamma_{ij} = \gamma_{ji} (i, j = 1, 2, \dots, n)$ ; ③传递性, 即  $R \circ R \subseteq R$ 。当条件均能满足时, 方可进行模糊聚类分析。由于关系矩阵  $R$  自反性和对称性均满足, 而传递性是否满足, 需要对相似矩阵进行满足传递性的转换。在此运用传递闭包法验证其传递性, 即

$$R \circ R \subseteq R^2, R^2 \circ R^2 \subseteq R^4, R^{2k} \circ R^{2k} \subseteq R^{4k} \quad (20)$$

式(20)中: “ $\circ$ ”为合成运算符号。合成运算计算方法为

$$\gamma_{ij} = \bigvee_{k=1}^{16} (\gamma_{ik} \wedge \gamma_{kj}) \quad (21)$$

式(21)中: “ $\wedge$ ”为取小运算, “ $\vee$ ”为取大运算。

通过式(19)和式(21)联立可得  $R^2$  如式(22)

$$R^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.696 & 0.741 & 0.674 & 0.713 & 0.782 & 0.674 & 0.797 & 0.770 & 0.805 & 0.805 & 0.702 & 0.712 & 0.726 & 0.702 & 0.776 \\ 0.696 & 1 & 0.689 & 0.647 & 0.696 & 0.696 & 0.689 & 0.696 & 0.696 & 0.696 & 0.696 & 0.696 & 0.689 & 0.696 & 0.696 & 0.696 \\ 0.741 & 0.689 & 1 & 0.674 & 0.768 & 0.799 & 0.655 & 0.782 & 0.741 & 0.795 & 0.760 & 0.726 & 0.725 & 0.668 & 0.669 & 0.694 \\ 0.674 & 0.647 & 0.674 & 1 & 0.737 & 0.698 & 0.621 & 0.674 & 0.694 & 0.728 & 0.688 & 0.694 & 0.698 & 0.781 & 0.762 & 0.741 \\ 0.713 & 0.696 & 0.768 & 0.737 & 1 & 0.768 & 0.664 & 0.768 & 0.764 & 0.768 & 0.760 & 0.723 & 0.818 & 0.737 & 0.737 & 0.737 \\ 0.782 & 0.696 & 0.799 & 0.698 & 0.768 & 1 & 0.689 & 0.782 & 0.770 & 0.795 & 0.795 & 0.726 & 0.768 & 0.737 & 0.702 & 0.795 \\ 0.674 & 0.689 & 0.655 & 0.621 & 0.664 & 0.689 & 1 & 0.664 & 0.664 & 0.689 & 0.664 & 0.655 & 0.655 & 0.664 & 0.664 & 0.664 \\ 0.797 & 0.696 & 0.782 & 0.674 & 0.768 & 0.782 & 0.664 & 1 & 0.770 & 0.782 & 0.797 & 0.726 & 0.764 & 0.717 & 0.702 & 0.730 \\ 0.770 & 0.696 & 0.741 & 0.694 & 0.764 & 0.770 & 0.664 & 0.770 & 1 & 0.737 & 0.737 & 0.725 & 0.764 & 0.728 & 0.702 & 0.737 \\ 0.805 & 0.696 & 0.795 & 0.728 & 0.768 & 0.795 & 0.689 & 0.782 & 0.737 & 1 & 0.815 & 0.725 & 0.737 & 0.741 & 0.728 & 0.841 \\ 0.805 & 0.696 & 0.760 & 0.688 & 0.760 & 0.795 & 0.664 & 0.797 & 0.737 & 0.815 & 1 & 0.702 & 0.712 & 0.741 & 0.702 & 0.815 \\ 0.702 & 0.696 & 0.726 & 0.694 & 0.723 & 0.726 & 0.655 & 0.726 & 0.725 & 0.725 & 0.702 & 1 & 0.725 & 0.702 & 0.702 & 0.702 \\ 0.712 & 0.689 & 0.725 & 0.698 & 0.818 & 0.768 & 0.655 & 0.764 & 0.764 & 0.737 & 0.712 & 0.725 & 1 & 0.737 & 0.694 & 0.694 \\ 0.726 & 0.696 & 0.668 & 0.781 & 0.737 & 0.737 & 0.664 & 0.717 & 0.728 & 0.741 & 0.741 & 0.702 & 0.737 & 1 & 0.762 & 0.741 \\ 0.702 & 0.696 & 0.669 & 0.762 & 0.737 & 0.702 & 0.664 & 0.702 & 0.702 & 0.728 & 0.702 & 0.702 & 0.694 & 0.762 & 1 & 0.741 \\ 0.776 & 0.696 & 0.694 & 0.741 & 0.737 & 0.795 & 0.664 & 0.737 & 0.737 & 0.841 & 0.815 & 0.702 & 0.694 & 0.741 & 0.741 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$R^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0.696 & 0.795 & 0.741 & 0.768 & 0.795 & 0.689 & 0.797 & 0.770 & 0.805 & 0.805 & 0.726 & 0.768 & 0.741 & 0.741 & 0.805 \\ 0.696 & 1 & 0.696 & 0.696 & 0.696 & 0.696 & 0.689 & 0.696 & 0.696 & 0.696 & 0.696 & 0.696 & 0.696 & 0.696 & 0.696 & 0.696 \\ 0.795 & 0.696 & 1 & 0.737 & 0.768 & 0.799 & 0.689 & 0.782 & 0.770 & 0.795 & 0.795 & 0.726 & 0.768 & 0.741 & 0.737 & 0.795 \\ 0.741 & 0.696 & 0.737 & 1 & 0.737 & 0.741 & 0.689 & 0.737 & 0.737 & 0.741 & 0.741 & 0.725 & 0.737 & 0.781 & 0.762 & 0.741 \\ 0.768 & 0.696 & 0.768 & 0.737 & 1 & 0.768 & 0.689 & 0.768 & 0.768 & 0.768 & 0.768 & 0.726 & 0.818 & 0.741 & 0.737 & 0.768 \\ 0.795 & 0.696 & 0.799 & 0.741 & 0.768 & 1 & 0.689 & 0.795 & 0.770 & 0.795 & 0.795 & 0.726 & 0.768 & 0.741 & 0.741 & 0.795 \\ 0.689 & 0.689 & 0.689 & 0.689 & 0.689 & 0.689 & 1 & 0.689 & 0.689 & 0.689 & 0.689 & 0.689 & 0.689 & 0.689 & 0.689 & 0.689 \\ 0.797 & 0.696 & 0.782 & 0.737 & 0.768 & 0.795 & 0.689 & 1 & 0.770 & 0.797 & 0.797 & 0.726 & 0.768 & 0.741 & 0.737 & 0.797 \\ 0.770 & 0.696 & 0.770 & 0.737 & 0.768 & 0.770 & 0.689 & 0.770 & 1 & 0.770 & 0.770 & 0.726 & 0.768 & 0.737 & 0.737 & 0.770 \\ 0.805 & 0.696 & 0.795 & 0.741 & 0.768 & 0.795 & 0.689 & 0.797 & 0.770 & 1 & 0.815 & 0.726 & 0.768 & 0.741 & 0.741 & 0.841 \\ 0.805 & 0.696 & 0.795 & 0.741 & 0.768 & 0.795 & 0.689 & 0.797 & 0.770 & 0.815 & 1 & 0.726 & 0.768 & 0.741 & 0.741 & 0.815 \\ 0.726 & 0.696 & 0.726 & 0.725 & 0.726 & 0.726 & 0.689 & 0.726 & 0.726 & 0.726 & 0.726 & 1 & 0.726 & 0.726 & 0.725 & 0.726 \\ 0.768 & 0.696 & 0.768 & 0.737 & 0.818 & 0.768 & 0.689 & 0.768 & 0.768 & 0.768 & 0.768 & 0.726 & 1 & 0.737 & 0.737 & 0.768 \\ 0.741 & 0.696 & 0.741 & 0.781 & 0.741 & 0.741 & 0.689 & 0.741 & 0.737 & 0.741 & 0.741 & 0.726 & 0.737 & 1 & 0.762 & 0.741 \\ 0.741 & 0.696 & 0.737 & 0.762 & 0.737 & 0.741 & 0.689 & 0.737 & 0.737 & 0.741 & 0.741 & 0.725 & 0.737 & 0.762 & 1 & 0.741 \\ 0.805 & 0.696 & 0.795 & 0.741 & 0.768 & 0.795 & 0.689 & 0.797 & 0.770 & 0.841 & 0.815 & 0.726 & 0.768 & 0.741 & 0.741 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

所示。

进而得到  $R^2 \circ R^2 = R^4$  的运算结果如式(23)所示。

$R^4 \circ R^4 = R^8$  的运算结果如式(24)所示。

$R^8 \circ R^8 = R^{16}$  的运算结果如式(25)所示。

$R^{16} \circ R^{16} = R^{32}$  的运算结果如式(26)所示。

可以看出  $R^{16} = R^{32}$ , 此时  $R^{32}$  已满足传递性要求, 可进行聚类分析。对  $R^{32}$  采用不同的阈值  $\lambda \in [0, 1]$  进行截取。当  $R^{32}$  中元素  $\gamma_{ij} \geq \lambda$  时, 记为 1;  $\gamma_{ij} < \lambda$  时, 记为 0, 由此可得到一系列  $\lambda$  水平截矩阵  $R_\lambda$ 。该矩阵为  $[0, 1]$  矩阵, 具有相同特征向量的单元聚为一类。

基于上述分析过程, 当  $0.762 \leq \lambda < 1$  时, 由模糊等价矩阵  $R^{32}$  可得单位矩阵如式(27)所示。此时, 焦坪矿区样本巷道围岩稳定性可划分为 5 类, 即  $\{1, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 16\}$ ,  $\{4, 14, 15\}$ ,  $\{2\}$ ,  $\{7\}$ ,  $\{12\}$ 。



$$R_{0.762 \leq \lambda < 1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

同理可得阈值  $\lambda$  分别为 1、0.841、0.818、0.815、0.805、0.797、0.795、0.781、0.768、0.741、0.726、0.696 及 0.689 的不同截矩阵,其聚类单元具有不同的分类。逐步归类,具体聚类过程如下。

当  $\lambda = 1$  时,样本被划分为 16 类,即  $\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{10\}, \{11\}, \{12\}, \{13\}, \{14\}, \{15\}, \{16\}$ 。

当  $\lambda = 0.841$  时,样本被划分为 15 类,即  $\{10, 16\}, \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{11\}, \{12\}, \{13\}, \{14\}, \{15\}$ 。

当  $\lambda = 0.818$  时,样本被划分为 14 类,即  $\{10, 16\}, \{5, 13\}, \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{11\}, \{12\}, \{14\}, \{15\}$ 。

当  $\lambda = 0.815$  时,样本被划分为 12 类,即  $\{9, 10, 11, 16\}, \{5, 13\}, \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{12\}, \{14\}, \{15\}$ 。

当  $\lambda = 0.805$  时,样本被划分为 11 类,即  $\{1, 9, 10, 11, 16\}, \{5, 13\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{12\}, \{14\}, \{15\}$ 。

当  $\lambda = 0.799$  时,样本被划分为 10 类,即  $\{1, 9, 10, 11, 16\}, \{5, 13\}, \{3, 6\}, \{2\}, \{4\}, \{7\}, \{8\}, \{12\}, \{14\}, \{15\}$ 。

当  $\lambda = 0.797$  时,样本被划分为 9 类,即  $\{1, 8, 9, 10, 11, 16\}, \{5, 13\}, \{3, 6\}, \{2\}, \{4\}, \{7\}, \{12\}, \{14\}, \{15\}$ 。

当  $\lambda = 0.795$  时,样本被划分为 8 类,即  $\{1, 3, 6, 8, 9, 10, 11, 16\}, \{5, 13\}, \{2\}, \{4\}, \{7\}, \{12\}, \{14\}, \{15\}$ 。

当  $\lambda = 0.781$  时,样本被划分为 7 类,即  $\{1, 3, 6, 8, 9, 10, 11, 16\}, \{5, 13\}, \{4, 14\}, \{2\}, \{7\}, \{12\}, \{15\}$ 。

当  $\lambda = 0.768$  时,样本被划分为 6 类,即  $\{1, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 16\}, \{4, 14\}, \{2\}, \{7\}, \{12\}, \{15\}$ 。

当  $\lambda = 0.741$  时,样本被划分为 4 类,即  $\{1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16\}, \{2\}, \{7\}, \{12\}$ 。

当  $\lambda = 0.726$  时,样本被划分为 3 类,即  $\{1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16\}, \{2\}, \{7\}$ 。

当  $\lambda = 0.696$  时,样本被划分为 2 类,即  $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16\}, \{7\}$ 。

当  $\lambda = 0.689$  时,所有样本归为一类。

### 3.3 样本巷道最优分类数的确定

在模糊聚类分析过程中,依据不同阈值  $\lambda$ ,可以得到不同的样本巷道分类。阈值  $\lambda$  取值越大,分类数目就越多。在工程实际中,一般依据  $F$  统计量法来确定样本巷道的最优分类数目,其计算公式为

$$F = \frac{A}{B} \quad (28)$$

$$\begin{cases} A = \sum_{j=1}^r n_j \sum_{k=1}^m \frac{[\bar{x}_k^{(j)} - \bar{x}_k]^2}{r-1} \\ B = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{k=1}^m \frac{[x_{ik}^{(j)} - \bar{x}_k^{(j)}]^2}{n-r} \end{cases} \quad (29)$$

式中: $n$  为样本总数; $r$  为分类数; $n_j$  为第  $j$  类的样本数量; $m$  为指标数; $\bar{x}_k$  为聚类样本第  $k$  个指标的平均值; $\bar{x}_k^{(j)}$  为第  $j$  类第  $k$  个指标的平均值; $x_{ik}^{(j)}$  为第  $j$  类第  $i$  个样本的第  $k$  个指标值。

例如,当  $\lambda = 0.762$  时,铜川某矿样本巷道稳定性被划分为 5 大类,此时统计量  $F$  的计算过程如下。

#### 3.3.1 分子 $A$ 的确定

(1) 各指标平均值  $\bar{x}_k$  的计算。根据表 5 中 16 个样本巷道 10 个指标的原始数据,可以分别求出各指标平均值分别为  $\bar{x}_k = 49.188, 43.824, 11.126, 938.313, 481.375, 65.625, 13.313, 1.256, 1.208$  及 5.750。

(2) 不同类别下各指标平均值  $\bar{x}_k^{(j)}$  的计算:对于第 1 类  $\{1, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 16\}$  的 10 个样本巷道,其不同指标的平均值分别为  $\bar{x}_k^{(1)} = 48.262, 42.443, 12.035, 935.2, 470.7, 67, 13.9, 1.279, 1.258, 5.5$ 。同理可得其他 4 个类别下不同指标平均值分别为  $\bar{x}_k^{(2)} = 55.663, 41.927, 8.653, 868.667, 462, 63.333, 10.333, 1.02, 0.86, 6$ ;  $\bar{x}_k^{(3)} = 48.51, 55.31, 13.65, 985, 545, 60, 15, 1.55, 1.28, 4$ ;  $\bar{x}_k^{(4)} = 45, 50, 5.69, 1020, 552, 80, 16, 1.55, 1.28, 8$ ;  $\bar{x}_k^{(5)} = 43.88, 45.66, 12.36,$

1 050, 512, 50, 12, 1. 14, 1. 55, 7。

(3) 分子  $A$  的计算。对于第 1 个类别  $\{1, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 16\}$  的 10 个样本巷道, 当分类数  $r=5, n_1=10, m=10$  时, 将其指标均值  $\bar{x}_k^{(1)}$  与总指标平均值  $\bar{x}_k$  代入式(30), 第 1 个类别下  $F$  计算式的分子为  $A_1=10(0.214 1+0.476 6+0.206 7+2.421 9+28.488 9+0.472 7+0.086 3+0.000 1+0.000 7+0.015 6)=323.837 4$ 。

依此类推, 可以得到第 2~5 类别下不同  $F$  计算式的分子大小分别为  $A_2=3 968.958 1, A_3=1 601.068 0, A_4=2 991.245 9, A_5=3 423.153 0$ , 则统计量  $F$  分子  $A=A_1+A_2+\dots+A_5=12 308.262 4$ 。

### 3.3.2 分母 $B$ 的确定

对于第 1 个类别  $\{1, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 16\}$  的 10 个样本巷道, 当分类数  $r=5, n=16, n_1=10, m=10$  时, 将表 5 中第 1 个类别下 10 个样本的各指标初始值  $x_{ik}^{(1)}$  与相应各指标的平均值  $\bar{x}_k^{(1)}$  代入式(30), 可以得到第 1 个类别下统计量  $F$  计算式的分母  $B_1=675.137 8+2 007.114 9+80.055 4+37.754 5+927.396 1+209.448 2+252.976 7+373.759 5+308.524 8+71.173 7=4943.341 6$ 。

依此类推, 可以得到第 2~5 类别下不同统计量  $F$  计算式的分母大小分别为  $B_2=118.110 8, B_3=0, B_4=0, B_5=0$ , 则统计量  $F$  分母  $B=B_1+B_2+\dots+B_5=5 061.452 4$ 。

### 3.3.3 $F$ 值的确定

将  $A$  和  $B$  的值代入式(28)可得统计量  $F=2.43$ 。基于上述分析过程, 同理可得其他阈值  $\lambda$  及其相应分类数条件下的统计量  $F$  值。由文献[28-29]可知 0.05 可信度下自由度为  $(r-1, n-r)$  时不同巷道稳定性分类数的统计值  $F_{0.05}(r-1, n-r)$ 。例如, 当样本巷道数  $n=16$ , 分类数  $r=5$  时, 0.05 可信度下的统计值为

$$F_{0.05}(5-1, 16-5)=3.36 \quad (30)$$

同理, 由文献[29]可查得其他分类数条件下的统计值  $F_{0.05}$ 。当焦坪矿区样本巷道分类数由 2 增加至 15 时, 相应的阈值  $\lambda$ 、统计量  $F$  值及其在 0.05 可信度下的统计值  $F_{0.05}$  值如表 7 所示。根据数理统计方差分析理论,  $F$  与  $F_{0.05}$  之间的差值越大, 表明不同样本之间的差异性越显著, 分类效果越好。

由表 7 可知, 当阈值  $\lambda=0.762$ , 分类数  $r=5$  时,  $F$  与  $F_{0.05}$  之间差异性最为显著。因此, 将焦坪矿区 16 条样本巷道稳定性分为非常稳定 (I)、稳定 (II)、基本稳定 (III)、不稳定 (IV) 及极不稳定 (V) 共 5 大类最为合理。巷道稳定性综合评价值<sup>[25]</sup>为

$$\Psi = WX \quad (31)$$

式(31)中:  $W$  为指标权重集;  $X$  为样本巷道指标标准化后数据集。

对于某一稳定性类别, 当存在多个样本巷道时, 取各样本巷道综合评价值的均值作为该稳定性类别的综合评价价值。由表 3 及式(31)计算各稳定性类别下的综合评价价值。例如, 巷道非常稳定时的综合评价价值为

$$\psi = 0.38 \times 0.10 + \dots + 1 \times 0.05 = 0.86 \quad (32)$$

同理可得其他巷道稳定性类别的综合评价价值。按照综合评价价值大小对分类结果进行排序, 焦坪矿区样本巷道分类结果如表 8 所示。

表 7 焦坪矿区巷道稳定性最优分类数计算结果

分类数	$\lambda$	$F$	$F_{0.05}$	$F - F_{0.05}$
2	0.696	1.94	4.60	-2.66
3	0.726	1.74	3.81	-2.07
4	0.741	2.33	3.49	-1.16
5	0.762	2.43	3.36	-0.93
6	0.768	1.83	3.33	-1.5
7	0.781	1.60	3.37	-1.77
8	0.795	1.23	3.50	-2.27
9	0.797	2.00	3.73	-1.73
10	0.799	2.41	4.10	-1.69
11	0.805	3.27	4.74	-1.47
12	0.815	4.56	5.91	-1.35
14	0.818	8.00	19.42	-11.42
15	0.841	11.77	245.36	-233.59

表 8 焦坪矿区巷道稳定性分类结果

类别	综合评价价值	样本巷道编号
I	0.86~1.00	7
II	0.67~0.86	2
III	0.48~0.67	1, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 16
IV	0.35~0.48	12
V	0.00~0.35	4, 14, 15

### 3.4 巷道稳定性分类指标聚类中心的构建

将各样本指标初始值的均值作为聚类中心各指标的标准值。根据表 8 聚类分析结果, 结合表 5 及表 6 相关数据构建焦坪矿区巷道围岩稳定性聚类中心, 如表 9 所示。

在建立焦坪矿区巷道稳定性聚类中心的基础上, 通过将新掘巷道的 10 个关键参数代入式(16)中进行标准化处理, 再利用式(31)计算新掘巷道围岩稳定性综合评价价值, 并与聚类中心综合评价价值进行对比分析, 即可准确预测新掘巷道围岩的稳定性类别, 进而合理设计围岩的支护方案及其参数。

表9 焦坪矿区巷道稳定性聚类中心

Table 9 Clustering center of roadway stability in Jiaoping mining area

分类		0.1	0.07	0.03	0.06	0.27	0.23	0.1	0.05	0.04	0.05		
类别	稳定状态	综合评价值	是否标准化	$\sigma_r$	$\sigma_w$	$\sigma_f$	$P_e$	$H$	$X$	$D$	$L$	$N$	$\sigma_h$
I	非常稳定	0.86~1.00	标准化前	45	50	5.69	927	552	20	0.64	1.55	1.28	20.8
			标准化后	0.38	0.76	0	0.75	1	1	1	0.99	0.66	1
II	稳定	0.67~0.86	标准化前	48.51	55.31	13.65	895	545	15	0.6	1.55	1.28	10.4
			标准化后	0.52	1	0.71	0.6	0.94	0.33	0.86	0.99	0.66	0
III	基本稳定	0.48~0.67	标准化前	48.26	42.44	12.04	850	471	16.75	0.56	1.28	1.93	14.31
			标准化后	0.51	0.42	0.57	0.4	0.32	0.57	0.7	0.6	0.64	0.38
IV	不稳定	0.35~0.48	标准化前	43.88	45.66	12.36	955	512	12.5	0.48	1.14	1.55	18.16
			标准化后	0.33	0.57	0.6	0.88	0.67	0	0.43	0.4	1	0.75
V	极不稳定	0.00~0.35	标准化前	55.66	41.93	8.65	790	462	15.83	0.4	1.02	0.86	15.62
			标准化后	0.8	0.4	0.27	0.12	0.25	0.44	0.19	0.23	0.14	0.5

## 4 支护设计与效果分析

### 4.1 焦坪矿区巷道支护对策分析

基于上述焦坪矿区巷道的不同稳定性分类结果,通过对焦坪矿区不同类别巷道变形破坏特征进行研究,针对性地提出不同稳定性条件下焦坪矿区巷道合理支护对策如表10所示,实现巷道的差异化支护。

### 4.2 2407回风顺槽稳定性预测

玉华矿2407工作面主要可采煤层为侏罗纪4-2

煤层,回风顺槽倾向长度为1620m,平均埋深490m,煤层厚度为5.0~10.0m,平均厚度7.4m。2407回风顺槽开挖时,巷道顶板沿煤层上部炭质泥岩掘进,顺槽断面为典型的矩形巷道,巷道宽度为5.0m,巷帮高4.0m。现将2407新掘回风顺槽按照倾向长度采用400m等间距划分为4个区段进行围岩稳定性预测,并结合表5样本巷道数据及式(18)进行标准化处理。预测断面各指标初始值及其标准化计算结果如表11所示。

表10 焦坪矿区巷道支护对策选择标准

Table 10 Selection criteria for roadway support countermeasures in Jiaoping mining area

稳定状态	部位	支护形式	锚杆			锚索		
			直径/mm	长度/m	间排距/mm	直径/mm	长度/m	间排距/mm
非常稳定	顶板	锚杆	16~18	1.6~1.8	1.0~1.2	—	—	—
	帮部	锚杆	16~18	1.6~1.8	1.0~1.2	—	—	—
稳定	顶板	锚网(梁)	16~20	1.8~2.2	1.0~1.2	—	—	—
	帮部	锚网(梁)	16~20	1.8~2.2	1.0~1.2	—	—	—
基本稳定	顶板	锚梁(带)网索	18~20	2.0~2.2	0.8~1.2	17.8	3~7	1~4
	帮部	锚梁(带)网	18~20	2.2~2.4	0.8~1.2	—	—	—
不稳定	顶板	锚梁(带)网索	20~22	2.2~2.4	0.8~1.0	17.8	4~9	1~3
	帮部	锚梁(带)网	20~22	2.2~2.6	0.8~1.0	—	—	—
	底板	锚杆	20~22	2.5~3.5	0.8~1.0	—	—	—
极不稳定	顶板	锚梁(带)网索	22~25	2.4~2.6	0.7~1.0	17.8或21.6	6~10	0.7~2
	帮部	锚梁(带)网索	22~25	2.4~2.6	0.7~1.0	17.8或21.6	5~7	0.7~2
	底板	锚杆	20~25	2.5~3.5	0.7~1.0	—	—	—

表11 2407回风顺槽巷道稳定性指标

Table 11 Stability index of surrounding rock of 2407 return wind along the groove roadway

断面	$\sigma_{rc}/\text{MPa}$	$\sigma_{wc}/\text{MPa}$	$\sigma_{fc}/\text{MPa}$	$P_e/\text{kPa}$	$H/\text{m}$	$X/\text{m}$	$D$	$L$	$N$	$\sigma_{hc}/\text{MPa}$
断面1	42.32	46.56	11.68	801	490	15	0.50	1.25	1.13	14.85
标准化值	0.27	0.61	0.54	0.17	0.48	0.33	0.50	0.56	0.48	0.43
断面2	42.88	43.10	10.53	801	505	15	0.48	1.25	1.15	15.26
标准化值	0.29	0.45	0.43	0.17	0.61	0.33	0.43	0.56	0.5	0.47
断面3	45.84	48.40	12.78	801	509	15	0.54	1.25	1.13	15.65
标准化值	0.41	0.69	0.64	0.17	0.64	0.33	0.64	0.56	0.48	0.50
断面4	46.04	49.40	12.55	801	510	15	0.52	1.25	1.16	15.88
标准化值	0.42	0.74	0.61	0.17	0.65	0.33	0.57	0.56	0.51	0.53

根据表3各指标权重集和表10中断面1各指标标准化值,由式(31)可得玉华矿2407回风顺槽区段1的稳定性综合评价值为

$$\psi_1 = 0.27 \times 0.10 + \dots + 0.43 \times 0.05 = 0.42 \quad (33)$$

同理可得区段2~4的综合评价价值分别为0.44、0.50及0.51。将各断面综合评价价值与表9聚类中心综合评价价值范围进行比较,可知2407回风顺槽区段1、2处于不稳定状态,区段3、4处于基本稳定状态。

### 4.3 2407回风顺槽巷道支护方案

根据2407工作面回风顺槽具体工程地质条件,结合表11所示的支护标准,确定回风顺槽支护方案及参数。

#### 4.3.1 1~2区段巷道支护方案

(1)顶板支护。采用锚杆+锚索联合支护。每排布设5根 $\Phi 17.8$  mm的预应力钢绞线,锚索长度为8 500 mm,锚固长度3 000 mm,间排距为1 200 mm $\times$ 1 200 mm,中部锚索角度与顶板垂直,两端锚索角度与顶板垂直,两端锚索垂直方向可有30°左右的偏角;每排布设6根 $\Phi 20$  mm的左旋螺纹钢锚杆,锚杆长度为2 400 mm,锚固长度900 mm,间排距为900 mm $\times$ 900 mm,锚杆角度均与顶板垂直。

(2)巷帮支护。采用全锚杆支护。每排布设5根 $\Phi 20$  mm的左旋螺纹钢锚杆,锚杆长度为2 400 mm,锚固长度900 mm,间排距为900 mm $\times$ 900 mm,

顶端锚杆距顶板200 mm,底端锚杆距底板200 mm,锚杆水平方向可有10°左右的偏角。

(3)底板支护。采用全锚杆支护。每排布设7根锚杆,其中底板中部锚杆采用 $\Phi 20$  mm的左旋螺纹钢锚杆,锚杆长度为2 400 mm,锚固长度900 mm;底板锁脚锚杆采用 $\Phi 20$  mm的左旋螺纹钢锚杆,锚杆长度为3 000 mm,锚固长度1 200 mm,底板锚杆间排距为1 000 mm $\times$ 1 000 mm,锁脚锚杆垂直方向可有30°左右的偏角。因此,2407回风顺槽1、2区段围岩支护结构如图2所示。

#### 4.3.2 3~4区段巷道支护方案

(1)顶板支护。采用锚杆+锚索联合支护。每排布设5根 $\Phi 17.8$  mm的预应力钢绞线,锚索长度为8 000 mm,锚固长度2 800 mm,间排距为1 200 mm $\times$ 1 000 mm,中部锚索角度与顶板垂直,两端锚索垂直方向可有30°左右的偏角;每排布设6根 $\Phi 20$  mm的左旋螺纹钢锚杆,锚杆长度为2 200 mm,锚固长度800 mm,间排距为800 mm $\times$ 800 mm,锚杆角度均与顶板垂直。

(2)巷帮支护。采用全锚杆支护。每排布设5根 $\Phi 20$  mm的左旋螺纹钢锚杆,锚杆长度为2 200 mm,锚固长度800 mm,间排距为900 mm $\times$ 900 mm,顶角锚杆距顶板200 mm,底角锚杆距底板200 mm,锚杆水平方向可有10°左右的偏角。因此,2407回风顺槽3、4区段围岩支护结构如图3所示。

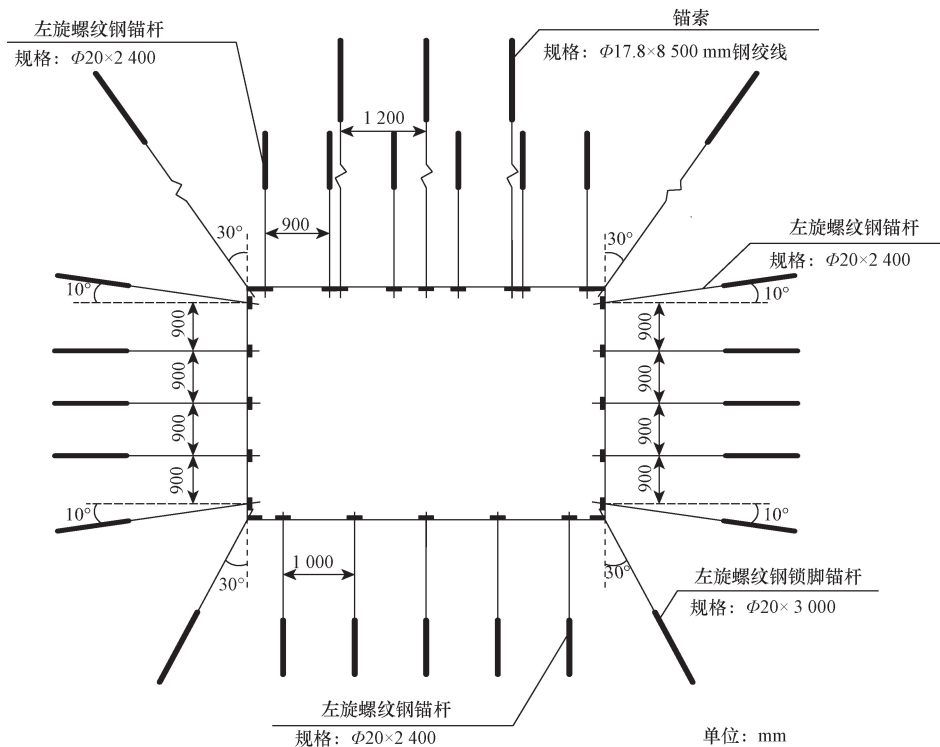


图2 2407回风顺槽1、2区段支护方案

Fig. 2 2407 return air along the groove 1 and 2 section support programme





图5 支护后巷道效果

Fig. 5 The effect of the roadway after the support

(I类)、稳定(II类)、基本稳定(III类)、不稳定(IV类)和极不稳定(V类),并提出了不同稳定性类别下的围岩支护对策。

(3)运用上述理论对玉华矿2407回风顺槽的围岩稳定性进行了预测,并提出针对性的支护对策。现场支护试验结果表明,围岩稳定后顶底板最大累计移近量为147 mm,两帮最大累计收敛量为107 mm,围岩变形控制效果良好,满足现场生产要求。

#### 参 考 文 献

- [1] 蒋金泉,冯增强,韩继胜. 跨采巷道围岩结构稳定性分类与支护参数决策[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 81-85.  
Jiang Jinquan, Feng Zengqiang, Han Jisheng. Classification structural stability of surrounding rocks of roadway affected by overhead mining and decision making of support parameters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(1): 81-85.
- [2] 周保生,朱维申,李术才. 综放回采巷道围岩稳定性分类的研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(5): 469-472.  
Zhou Baosheng, Zhu Weishen, Li Shucai. Stability classification of mining roadway for fully mechanized sublevel caving face[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(5): 469-472.
- [3] 李洪,蒋金泉,张开智. 回采巷道围岩分类的模糊聚类分析方法[J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(1): 12-16.  
Li Hong, Jiang Jinquan, Zhang Kaizhi. Fuzzy clustering analysis of tunnel surrounding rock classification [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(1): 12-16.
- [4] 丁新启,乔兰,朱兰洋. 基于模糊聚类分析的回采巷道围岩分类与支护研究[J]. 金属矿山, 2009(5): 11-15.  
Ding Xinqi, Qiao Lan, Zhu Lanyang. Study on the classification and support of the wall rock of mining roadway based on fuzzy clustering[J]. Metal Mine, 2009(5): 11-15.
- [5] 魏锦平,李宗岑,桑培森. 基于模糊综合评判的回采巷道围岩稳定性分类[J]. 煤炭工程, 2010(5): 69-72.  
Wei Jinping, Li Zongcen, Sang Peimiao. Classification on surrounding rock stability of mining gateway base on fuzzy comprehensive judgment[J]. Coal Engineering, 2010(5): 69-72.
- [6] 张志康,单仁亮,王连国,等. 霍州矿区煤巷围岩稳定性分类与支护对策研究[J]. 矿业安全与环保, 2011, 38(3): 17-20.  
Zhang Zhikang, Shan Renliang, Wang Lianguo, et al. Research on Huozhou mining area coal roadway stability classification of surrounding rock and supporting strategies[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2011, 38(3): 17-20.
- [7] 杨战标. 深井回采巷道围岩稳定性模糊聚类及其支护对策[J]. 煤炭工程, 2011(11): 91-93.  
Yang Zhanbiao. Fuzzy clustering of the stability of the surrounding rock of the deep well mining roadway and its supporting countermeasures[J]. Coal Engineering, 2011(11): 91-93.
- [8] 樊百胜. 焦作矿区煤巷围岩稳定性分类及控制技术[J]. 煤矿安全, 2012, 43(1): 144-147.  
Fan Baisheng. Stability classification and control research of roadway surrounding rock in Jiaozuo coal mine [J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(1): 144-147.
- [9] 李迎富. 深井回采巷道围岩稳定性分类及其控制技术[J]. 煤矿安全, 2013, 44(6): 75-78.  
Li Yingfu. Stability classification and control technique of surrounding rock in deep mining roadway[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(6): 75-78.
- [10] 郑学召,于远祥. 模糊等价聚类分析在王村矿围岩稳定性分析中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(5): 55-60.  
Zheng Xuezhao, Yu Yuanxiang. Fuzzy equivalent clustering analysis of surrounding rock stability in Wangcun mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(5): 55-60.
- [11] 齐彪,韩立军,陈轲,等. 白象山铁矿巷道围岩稳定性分类及支护对策研究[J]. 金属矿山, 2014(6): 31-36.  
Qi Biao, Han Lijun, Chen Ke, et al. Research on stability classification and support measures of roadway surrounding rock in Baixiangshan iron mine[J]. Metal Mine, 2014(6): 31-36.
- [12] 石永奎,张景煜,王文正,等. 回采巷道围岩稳定性的分类预测方法分析[J]. 煤炭技术, 2015, 34(7): 46-49.  
Shi Yongkui, Zhang Jingyu, Wang Wenzheng, et al. Analysis of prediction method of stability of surrounding rock in mining roadway[J]. Coal Technology, 2015, 34(7): 46-49.
- [13] 李健,靖洪文,苏海健,等. 基于围岩分级的深井巷道稳定性分析与应用[J]. 煤炭技术, 2015, 34(7): 98-101.  
Li Jian, Jing Hongwen, Su Haijian, et al. Stability analysis and application of deep mine roadway based on classification of surrounding rock[J]. Coal Technology, 2015, 34(7): 98-101.
- [14] 郭忠平,张贵银,韩春,等. 深部矿山破碎围岩巷道控制技术研究[J]. 金属矿山, 2015(8): 40-43.  
Guo Zhongping, Zhang Guiyin, Han Chun, et al. Research of the roadway control technology with crushed surrounding rock in deep mine[J]. Metal Mine, 2015(8): 40-43.
- [15] 杨仁树,王茂源,马鑫民,等. 煤巷围岩稳定性分类研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(10): 40-45, 92.  
Yang Renshu, Wang Maoyuan, Ma Xinmin, et al. Research on surrounding rock stability classification of coal drift[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(10): 40-45, 92.
- [16] 高杰,韩立军,孟庆彬,等. 软岩巷道围岩稳定性综合分类及应用[J]. 煤炭技术, 2016, 35(7): 27-29.  
Gao Jie, Han Lijun, Meng Qingbin, et al. Application and comprehensive classification of surrounding rock stability in soft rock roadway[J]. Coal Technology, 2016, 35(7): 27-29.
- [17] 王茂盛,朱晔,李永亮,等. 基于模糊聚类方法的煤巷围岩稳定性分类研究[J]. 矿业科学学报, 2018, 3(3): 238-245.

- Wang Maosheng, Zhu Ye, Li Yongliang, et al. Study on stability classification of surrounding rock of coal gateway based on fuzzy clustering method[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2018, 3(3): 238-245.
- [18] 王睿, 夏道洪, 邓祥辉, 等. 施工阶段隧道围岩快速分级法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(5): 2053-2060.
- Wang Rui, Xia Daohong, Deng Xianghui, et al. Rapid classification method of tunnel surrounding rock in construction stage[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(5): 2053-2060.
- [19] 李美晨, 赵启峰, 程志恒, 等. 巷道围岩失稳垮冒风险等级分类与差异性分级管控[J]. 煤炭技术, 2021, 40(11): 106-109.
- Li Meichen, Zhao Qifeng, Cheng Zhiheng, et al. Classification and differential grading control of surrounding rock instability collapse risk level of roadway[J]. Coal Technology, 2021, 40(11): 106-109.
- [20] 焦建康, 张镇, 颜立新, 等. 中小型煤矿巷道围岩稳定性量化评价及分级支护技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(3): 598-606.
- Jiao Jiankang, Zhang Zhen, Yan Lixin, et al. evaluation of surrounding rock stability and graded support technology in small and medium-sized coal mine tunnels [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(3): 598-606.
- [21] 董俊亮, 王庆雄, 李晓龙, 等. 活鸡兔煤矿顶板稳定性分析与支护方案设计[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(1): 123-128.
- Dong Junliang, Wang Qingxiong, Li Xiaolong, et al. Roof stability analysis and support scheme design of Huojitu coal mine[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(1): 123-128.
- [22] 马鑫民, 陈攀, 陈晨, 等. 基于机器学习的煤巷围岩稳定性预测与应用[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(2): 156-165.
- Ma Xinmin, Chen Pan, Chen Chen, et al. Prediction of surrounding rock stability of coal roadway based on machine learning and its application[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(2): 156-165.
- [23] 程志斌, 王祖洸, 李化敏, 等. 大同矿区回采巷道覆岩稳定性分类及支护参数优化[J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(5): 111-115.
- Cheng Zhibin, Wang Zuguang, Li Huamin, et al. Study on overburden stability classification and support parameters of mining roadway in Datong mining area[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(5): 111-115.
- [24] 马清水, 赵相铮, 宋振骥, 等. 回采巷道稳定性风险评判模型设计与系统应用[J]. 煤矿安全, 2024, 55(10): 1-11.
- Ma Qingshui, Zhao Xiangzheng, Song Zhenqi, et al. Design and system application of risk evaluation model for mining roadway stability[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(10): 1-11.
- [25] 刘祥. 皖北矿区回采巷道稳定性分类及支护智能决策支持系统研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
- Liu Xiang. Study on stability classification of mining roadway in Wanbei minefield area and support system of support intelligent decision[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2018.
- [26] 杨智. 基于层次分析法的保水采煤技术系统评价研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(7): 116-119.
- Yang Zhi. Research on system evaluation of water conservation coal mining technology based on analytic hierarchy process [J]. Coal Technology, 2023, 42(7): 116-119.
- [27] 那日萨. 模糊系统数学及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- Na Risa. Fuzzy systems mathematics and its applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017.
- [28] 杨仁树, 马鑫民. 煤矿巷道支护智能设计系统与工程应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.
- Yang Renshu, Ma Xinmin. Intelligent design system and engineering application of coal mine roadway support[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015.
- [29] 赵高长. 统计学及其应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013.
- Zhao Gaochang. Statistics and its application[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2013.