

原创技术策源地

基于 AHP-FCA 的矿井煤层瓦斯灾害 风险性评价

Disaster Risk Assessment of Coal Seam Gas in Mine Based on AHP-FCA

刘 鹏, 王英虎, 薛 涛(开滦(集团)有限责任公司东欢坨矿业分公司, 河北 唐山 064002)

摘 要:针对东欢坨矿采掘深度增加、煤层瓦斯灾害风险可能增大的现实问题,通过现场测定和实验室试验获得东欢坨矿7[#]、8[#]、9[#]、11[#]、12[#]煤层的煤体瓦斯放散初速度、煤体的坚固性系数、煤层瓦斯压力和煤层瓦斯含量等瓦斯基础参数,采用层次分析-模糊数学综合评价方法(AHP-FCA)开展了煤层瓦斯风险性评价。研究表明:依据层次分析法可以确定瓦斯突出危险性评价指标权重,得出煤层瓦斯压力对东欢坨煤层瓦斯突出灾害影响最大,建议应加强对瓦斯压力的监测与管理。结合模糊数学综合评价方法能有效对各个煤层瓦斯突出危险性进行综合评价。该评价方法能够对瓦斯危险性进行量化描述,直观地反映煤层危险程度。东欢坨煤矿各煤层瓦斯突出危险性均处于较轻程度范围内,发生瓦斯灾害的可能性较低,预测结果与实际情况较为符合。

关键词:瓦斯灾害;瓦斯基础参数测定;层次分析法;模糊数学综合评价

中图分类号: TD712.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)06-0001-06

Abstract: In view of the actual problems of increasing mining depth and possible increase of coal seam gas disaster risk in Donghuantuo Mine, the basic gas risk evaluation of coal seam such as the initial velocity of coal gas dispersion, the solidity coefficient of coal body, coal seam gas pressure and coal seam gas content of Donghuantuo Mine 7[#], 8[#], 9[#], 11[#] and 12[#] coal seam was obtained through on-site measurement and laboratory tests, and the analytic-fuzzy mathematical comprehensive evaluation method (AHP-FCA) was used to carry out the coal seam gas risk evaluation. The results show that according to the analytic hierarchy method, the weight of gas outburst risk evaluation index can be determined, and it is concluded that coal seam gas pressure has the greatest impact on the gas outburst disaster in Donghuantuo coal, and it is suggested that the monitoring and management of gas pressure should be strengthened. Combined with the fuzzy mathematical comprehensive evaluation method, the comprehensive evaluation of the outburst risk of gas in each coal seam can be effectively evaluated. This evaluation method can quantitatively describe the gas hazard and visually reflect the degree of coal seam danger. The results of each coal seam showed that the outburst risk of gas in each coal seam in Donghuantuo Coal Mine was within a relatively mild range, and the possibility of gas disaster was low, and the prediction results were more consistent with the actual situation.

Key words: coal and gas prominence; determination of gas basic parameters; analytic hierarchy; comprehensive evaluation of fuzzy mathematics

1 前言

以瓦斯、煤尘、水、火和顶板灾害构成煤矿五大典型灾害,而瓦斯作为“井下第一杀手”,对我国煤

矿安全生产起到了重大阻碍作用^[1]。随着采掘深度的逐年增加^[2-3],瓦斯灾害必将日趋严重。其中煤与瓦斯突出是在瞬间突出碎煤和瓦斯的动力灾害,其影响因素众多,突出机理复杂,还可能造成瓦斯爆炸等次生灾害进一步扩大损失程度,严重影响着威胁着矿井安全生产。

煤层瓦斯基础参数的测定作为矿井瓦斯治理的依据,它的准确与否直接关系到企业的经济效益^[4],影响着瓦斯综合治理的方案设计对后续研究瓦斯赋存规律,进行客观、科学的煤与瓦斯突出危险

[作者简介] 刘鹏(1978-),男,河北唐山人,工程师,主要从事矿井“一通三防”工作。

[基金项目] 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2022YJSAQ15)

[引用格式] 刘鹏,王英虎,薛涛.基于AHP-FCA的矿井煤层瓦斯灾害风险性评价[J].中国矿山工程,2022,51(6):1-6.

性评价、准确预测瓦斯突出危险区域以及提高矿井经济和社会效益有着重要意义^[5-7]。如何全面多指标客观评价煤与瓦斯突出等瓦斯灾害的危险程度,并在煤炭资源开采相应区域采取预防措施消除瓦斯突出危险性是提高煤矿安全生产必须要攻克的难题。

随着近年来国家越来越重视煤矿安全生产,国内外学者在煤与瓦斯突出危险性评价方面做了大量研究。常用的瓦斯突出评价方法有基数突变法、加权耦合法、模糊数学综合评价方法、事故树分析法、神经网络算法、遗传算法和灰色系统理论方法等^[8]。但模糊综合评价主观对评价结果影响较大,遗传算法在复杂系统中计算量大,神经网络算法评价结果与实际情况偏差较大等,很难用依据单一评价方法进行多指标综合性评价。

层次分析—模糊综合评判法是一种定性与定量分析相结合的方法,因其具有“相对标度”同时又可以利用专家的经验 and 评判,可以有效降低个体评价带来的分析误差。

在安全评价研究中,层次分析与模糊综合评价可以作为两种评价方法独立存在。张华林等^[9]将层次分析法应用在石油安全评价领域,对影响石油安全的因素进行层次重要性排序,指出资源以及市场因素会对石油安全造成较大影响;何天平等^[10]对化工园区的安全评价中使用了层次分析法,将影响化工园区安全的因素分为两个层次进行分析,结果得出企业自身安全状况所占权重最大,其中又以设备和物料的危险性为主,为化工园区的安全管理提供了方向。潘峰等^[11]在水环境质量评价领域中应用模糊综合评价法,针对水环境这种多因素之间存在复杂关系的评价对象,运用模糊综合评价得到定量结果,对五条河流进行了水质评级;张勇慧等^[12]运用模糊综合评价法对湘西地区常吉高速公路的142个岩质高边坡进行了稳定性分级评价,评级结果与实际情况较为接近。

从前人的研究可以看出,此两种方法在独立使用时存在一些不足,层次分析法只能给出影响目标层因素的权重指标,量化影响因素的重要程度,但是对整个评价对象的安全性无法做出定量评级;模糊综合评价法能够对层次分析法进行补充,给出定量评级结果,但其在构建评价模型时,权重集的确定对评价结果影响较大,主观确定权重集会使结果误差较大,层次分析法能够为模糊综合评价提供相对客

观的权重指标。因此两种评价方法结合形成的层次分析—模糊综合评判法评价结果较完整,与实际情况更为接近。

针对东欢坨矿采掘深度增加、煤层瓦斯灾害风险可能增大的现实问题,采用层次分析—模糊综合评判法对东欢坨煤矿多个煤层进行了煤与瓦斯突出危险程度的评价,为后期的矿井开采设计、采掘施工作业以及瓦斯综合治理工作的规划提供了理论依据。

2 相关理论与方法

2.1 层次分析法基本原理与步骤

AHP层次分析法是采用定性与定量分析相结合的手段,对较模糊或者复杂的问题进行决策的简易方法。这种分析方法可以量化决策者的经验判断,层次化决策者的思维过程,帮助研究者使用数学化的决策思维方式逐层比较相关因素并检验结果的合理性^[13]。层次分析法整体上分为4个步骤:建立层次决策模型、构造判断矩阵、确定权重、单排序的一致性检验^[14-15]。

1) 建立层次决策模型

采用层次分析法分析问题时要结合最终目的对决策目标按照各因素之间的隶属关系进行拆解和分层,构建出层次结构图。研究者所要解决的问题即目标层,与目标层存在隶属关系的准则层是中间层,最底下的一层就是与目标层具有一定联系的方案层。

2) 构造判断矩阵

采用两两比较的判断原理得到判断矩阵 $C = (c_{ij})$,用以判别同一层次各个指标相对重要性,采用表1的方法进行比较,具体方法见表1。

表1 元素相对重要程度确定

标度值	含义
1	两个元素重要度相等
3	一个元素的重要度稍高于另一个
5	一个元素的重要度明显高于另一个
7	一个元素的重要度强烈高于另一个
9	一个元素的重要度绝对高于另一个

c_{ij} 也可以取2,4,6,8以及相应的倒数即 $1/c_{ij}$ 用来比较因素 j 对因素 i 的重要程度。

3) 确定权重

通过式(1)首先将矩阵各列归一化,然后利用

式(2)计算各行算术平均值得到各评价指标的重要性权数,将各个评价指标的重要性权数以式(3)形式用向量表达出来即判断矩阵的特征向量。

$$c'_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sum_{i=1}^n c_{ij}} \quad (1)$$

式中, c_{ij} 为判断矩阵元素原始值; c'_{ij} 为矩阵元素列归一化后值; n 为矩阵阶数。

$$a_i = \frac{\sum_{j=1}^n c'_{ij}}{n} \quad (2)$$

式中, a_i 重要性权数; c'_{ij} 为矩阵元素列归一化后值; n 为矩阵阶数。

$$\bar{A} = (a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (3)$$

式中, \bar{A} 为判断矩阵的特征向量; a_n 为重要性权数; n 为矩阵阶数。

4) 单排序的一致性检验

① 计算判断最大特征值

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[CA]_i}{A_i} \quad (4)$$

② 计算判断一致性指标

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

③ 计算随即一致性比率

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

式中, n 为矩阵阶数; RI 为平均一致性指标,由表2确定,当 $CR < 0.1$ 时就可以认为判断矩阵的一致性满足要求。 RI 的取值见表2。

表2 RI 的取值

n	1	2	3	4
RI	0	0	0.58	0.94
n	5	6	7	8
RI	1.12	1.24	1.32	1.41

2.2 模糊数学综合评价步骤

模糊数学综合评价方法是在模糊环境下综合各因素影响,为达到某一目的对事物作出综合决策的方法^[16-18]。

1) 确定预测集和因素集

为了对预测指标进行定性,通过实际需要确定对应的预测集和因素集。其中 $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ 为 n 个预测集, $V = (v_1, v_2, \dots, v_m)$ 为 m 个因素集。

2) 确定权重

模糊关系矩阵 $R = (r_{nm})_{n \times m}$ 是因素集 U 和预测集 V 之间的模糊关系,也是影响因素和预测对象间的“合理关系”。一般可以通过统计类方法、模糊关系方程法以及层次分析确定权重。

3) 综合评价决策

利用模糊关系矩阵 R 和权重 A 可以根据式(7)做出综合评价决策得出结果。

$$B = A \cdot R = (a_1, a_2, \dots, a_n) \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix} \quad (7)$$

3 AHP-FCA 煤层瓦斯突出危险性研究

3.1 瓦斯基础参数测定

东欢坨煤矿位于河北省唐山市,隶属于开滦集团。煤矿整体呈北东走向,狭长分布于开滦矿区西南角,走向长度和轴向宽度分别为8000 m和500 m,矿区面积为52.197 km²,井田面积为40.5 km²。东欢坨煤矿年产450万t^[19],是开滦集团主力矿井之一。煤层瓦斯基础参数作为瓦斯突出危险性预测的前提,能够为AHP-FCA方法应用提供数据支撑,因此首先要对东欢坨煤矿煤层瓦斯基础参数进行测定。

1) 煤层瓦斯压力测定

煤层瓦斯压力是指未经过瓦斯抽采、采动以及卸压等影响瓦斯压力活动的煤层中的瓦斯压力。一般具有主动测压法和被动测压法两种方法。根据东欢坨煤矿实际情况,采用被动测压法。在测压孔封好24 h后,持续观察一段时间。若出现压力表在某个数值持续没有变化或72 h内的变化值不超过0.015 MPa的情况,即可认为该数值为测压孔的瓦斯压力读数^[20],瓦斯压力测定如图1所示。



图1 瓦斯压力测定

2) 煤层瓦斯含量测定

按照 GB/T 23250—2009 煤层原始瓦斯含量测定方法规定,对井下自然解吸瓦斯量、瓦斯损失量以及残存瓦斯含量三部分进行测定^[21]。煤层瓦斯含量指的是单位体积的煤中吸附的标准状态下的瓦斯量,它是瓦斯基础参数测定中最重要的—部分参数,可以对瓦斯总含量和涌出量进行预测,也能用来评判煤与瓦斯突出危险程度,图 2 所示为测定井下自然解吸瓦斯量。



图 2 井下自然解吸瓦斯量测定

3) 煤层瓦斯放散初速度测定

煤的瓦斯放散初速度主要反映的是瓦斯在煤层突然揭开的压力梯度作用下,于短时间内从煤层内部高压区释放到开采空间低压区的能力大小,是衡量瓦斯排放特性的主要参数之一,也是识别煤层和瓦斯突破风险的指标之一^[22]。本次测试采用 WT-1 型瓦斯扩散速度测定仪,进行样品的瓦斯放散初速度测试工作。WT-1 型瓦斯扩散速度测定仪如图 3 所示。



图 3 WT-1 型瓦斯扩散速度测定仪

4) 煤的坚固性系数测定

煤的坚固性系数 f 值的大小主要取决于煤体的强度、硬度等参数。测量方法根据《煤固体系数的测定》(GB/T 23561.12—2010) 中的落锤法,即通过锤子的自由落体运动将测试煤块破碎,然后对测试煤块的破碎程度进行量化统计分析。煤体的坚固性系数 f 是煤层破裂风险的预测指标之一,其值间接反映了煤体的强度。坚固性系数测定装置如图 4 所

示,由式 8 计算煤的坚固性系数^[23]。

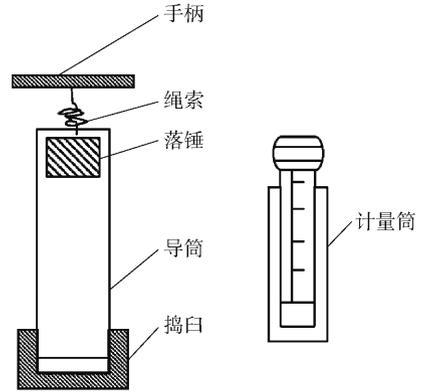


图 4 坚固性系数测定装置

$$f = \frac{20n}{l} \quad (8)$$

式中: f 为坚固性系数; n 为每份试样冲击次数,次; l 为每组试样筛下煤粉的计量高度,mm。

5) 煤的破坏类型

煤的破坏类型指的是按照煤被破碎的程度划分的五种类型,危险性逐级增大,其中第Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类型的煤具有煤与瓦斯突出的危险性^[24-25]。取各个煤层煤样通过观察各个煤样的构造、节理、端口性质并测试其强度,判断其破坏类型。

东欢坨煤矿的煤层瓦斯基础参数测定结果见表 3。

表 3 东欢坨煤矿煤层瓦斯基础参数

煤层	瓦斯压力/MPa	瓦斯含量/ $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	放散初速度/mmHg	坚固性系数	破坏类型
5	0.59	4.86	8.2		
7	0.11	0.89	4.6	0.83	Ⅳ类
8	0.52	3.94	7.9		
8	0.39	4.91	4.8	0.91	Ⅲ类
9	0.36	2.41	3.47	0.38	Ⅳ类
11	0.40	4.77	4.27	0.59	Ⅲ类

3.2 瓦斯危险性模糊综合评价模型构建

1) 建立因素集

根据东欢坨煤矿试验得到的瓦斯基础参数,建立评价因素集 $U = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$, 其中 u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 分别为破坏类型、瓦斯放散初速度、坚固性系数、煤层瓦斯压力以及煤层瓦斯含量。

2) 建立评价集

评价集即可能的评价结果组成的集合,对东欢坨煤矿瓦斯灾害危险性的评价建立评价集 $V = (v_1,$

v_2, v_3, v_4, v_5), 其中 v_1, v_2, v_3 分别为危险程度“严重”“中等”“较轻”, v_4, v_5 分别“可能”发生危险和“不可能”发生危险。评价指标隶属于评价集中不同评价结果的临界值或定性描述参考相关文献和规定, 瓦斯危险性评价结果对照见表 4。

表 4 瓦斯危险性评价结果对照表

危险程度	无	较轻	中等	严重	特别严重
区间值	80 ~ 100	70 ~ 80	60 ~ 70	40 ~ 60	0 ~ 40
量化值	90	75	65	50	20

3) 建立权重集

本文采用层次分析法确定各因素的权重。根据因素集中的五个因素与煤矿瓦斯突出灾害的隶属关系构建递阶层次结构构造的比较判别矩阵见表 5。

表 5 比较判别矩阵表

	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
u_1	1	1/2	1/2	1	1
u_2	2	1	1	1/2	1
u_3	2	1	1	1/2	2
u_4	1	2	2	1	2
u_5	1	1	1/2	1/2	1

采用和积法求取权重向量 A , 首先对判断矩阵按列归一化, 然后求取每一行的算数平均值, 构成权重向量 $A = (0.15, 0.19, 0.22, 0.30, 0.14)$ 。最后根据式(9)对判断矩阵进行一致性检验

$$CR = \left(\sum_{i=1}^n \frac{[CA]_i}{nA_i} - n \right) (n-1) \quad (9)$$

式中, CR 为一致性比例, C 为判断矩阵, A 为权重向量, n 为判断矩阵阶数, RI 为平均随机一次性指标, 由查表可得为 1.12。所得 CR 值 $0.0532 < 0.1$, 则认为判断矩阵的一致性可以接受。由层次分析法所得: 东欢坨煤矿瓦斯突出灾害的影响因素中 u_4 即煤层瓦斯压力所占权重最大, 其对瓦斯灾害危险程度影响居于首要地位。

4) 模糊综合评价过程

按照前文叙述模糊综合评价步骤对东欢坨煤矿特定煤层进行危险性模糊综合评价, 为后续预测瓦斯危险性大小及级别提供依据。下面以 7# 煤层为例, 简述评价过程, 根据东欢坨煤矿实际情况, 由评估专家根据煤矿现场实际情况, 对评价体系中各因素等级进行评估打分, 得到模糊综合评估矩阵集见表 6。

表 6 模糊综合评估矩阵集

指标	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
u_1	0.154	0.304	0.310	0.200	0.032
u_2	0.220	0.157	0.350	0.223	0.050
u_3	0.107	0.268	0.354	0.211	0.050
u_4	0.311	0.298	0.191	0.200	0.000
u_5	0.164	0.236	0.313	0.237	0.050

对因素集中的指标进行计算后得到指标集的评价结果, 然后按照评价指标相对于评价结果的隶属关系结合东欢坨煤矿实际情况将各指标隶属度进行归类。将结果归一化处理后即为煤与瓦斯突出危险性的模糊综合评价体系。评价指标的评价集由式(10)计算

$$B = A \cdot R \quad (10)$$

式中, B 为总体评价集, A 为评价因素权重集, R 为隶属度矩阵。

瓦斯危险性模糊评价向量为

$$B = A \cdot R = (0.15, 0.19, 0.22, 0.30, 0.14) \cdot$$

$$\begin{pmatrix} 0.154 & 0.304 & 0.310 & 0.200 & 0.032 \\ 0.220 & 0.157 & 0.350 & 0.223 & 0.050 \\ 0.107 & 0.268 & 0.354 & 0.211 & 0.050 \\ 0.311 & 0.298 & 0.191 & 0.200 & 0.000 \\ 0.164 & 0.236 & 0.313 & 0.237 & 0.050 \end{pmatrix} =$$

$$(0.30, 0.298, 0.22, 0.211, 0.050)$$

对结果进行归一化处理, 最终得到评价向量 $B = (0.28, 0.28, 0.20, 0.20, 0.04)$, 进行等级评定, 综合评判分值为

$$V = 90 \times 0.28 + 75 \times 0.28 + 65 \times 0.20 + 50 \times 0.20 + 20 \times 0.04 = 70$$

根据瓦斯危险评价等级划分, 可知东欢坨煤矿 7# 煤层的瓦斯危险性 $V_2 = 70$, 整体水平为瓦斯灾害危险较轻, 发生瓦斯灾害的可能性较低。根据上述计算方法, 依次对 7#、8#、9#、11#、12# 煤层分别进行模糊综合危险性评价, 最终的评价结果见表 7。

表 7 各煤层模糊综合评价结果

煤层	7#	8#	9#	11#	12#
得分	70.0	71.2	70.9	70.0	73.1
评价结果	V_2	V_2	V_2	V_2	V_2

5 结论

(1) 在现场以及实验室进行了瓦斯基础参数测

试,得到了东欢坨各个煤层的瓦斯压力、原始瓦斯含量、瓦斯放散初速度指标以及煤的坚固性系数等瓦斯基础参数数据。

(2)采用层次分析法确定瓦斯危险性模糊综合评价模型中因素集的权重,所得指标权重更准确、客观,能够突出主要因素对瓦斯危险程度的影响。基于层次分析法和模糊综合评价相结合的方法对东欢坨各煤层瓦斯突出危险程度做出评价:各煤层瓦斯突出危险性均处于“较轻”程度范围内,但处于评价“较轻”危险程度的下限边缘。

(3)由层析分析法得出煤层瓦斯压力对东欢坨煤层瓦斯突出灾害影响最大,建议应加强对瓦斯压力的监测与管理。如有瓦斯涌出异常现象,须采取区域防突、局部防突、瓦斯抽采等必要的安全技术措施。煤层瓦斯参数随着采掘巷道向新区域的延伸逐渐发生变化,建议矿方将瓦斯参数测定工作常态化,随时掌握煤层瓦斯的变化及突出危险性情况,确保矿井安全生产。建议应定期对传感器调试、校正,并加强管理和维护,保证安全监控系统正常运转和工作,当监控设备发生故障时,必须及时处理,在故障期间必须有安全措施。

[参考文献]

- [1] 李润求,施式亮,念其锋,等.近10年我国煤矿瓦斯灾害事故规律研究[J].中国安全科学报,2011,21(9):143-151.
- [2] 解北京,栾铮,陈冬新,等.不同长径比煤样动力学特征及本构模型[J/OL].矿业科学学报,1-12.
- [3] 栾铮.恒大煤矿高抽巷瓦斯治理技术研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2021.
- [4] 张成辉.古城煤矿3号煤层瓦斯基础参数测试研究[J].煤矿现代化,2022,31(4):49-53.
- [5] 王金君,林媛媛.百灵煤矿煤与瓦斯突出危险性评价[J].华北科技学院学报,2014,11(1):18-21.
- [6] 徐恩宇,李希建,薛峰.AHP-GT耦合模型下煤与瓦斯突出危险性评价[J].煤矿安全,2022,53(4):172-177.
- [7] 杨培君,谢雄刚,韦善阳,等.基于熵权突变理论的煤与瓦斯突出危险性评价[J].矿业研究与开发,2021,41(7):38-43.
- [8] 杨军.煤矿安全风险评价与预警研究[D].徐州:中国矿业大学,2013.
- [9] 张华林,刘刚.层次分析法在石油安全评价中的应用[J].天然气工业,2006(4):135-137+167.
- [10] 何天平,程凌.层次分析法在化工园区安全评价中的应用[J].中国安全生产科学技术,2008(4):81-84.
- [11] 潘峰,付强,梁川.模糊综合评价在水环境质量综合评价中的应用研究[J].环境工程,2002(2):58-61+5.
- [12] 张勇慧,李红旭,盛谦,等.基于模糊综合评判的公路岩质边坡稳定性分级研究[J].岩土力学,2010,31(10):3151-3156.
- [13] 丁旭辉.基于AHP层次分析法的山东省医药制造业竞争力分析[D].景德镇:景德镇陶瓷大学,2022.
- [14] 宋超.基于网络层次分析法的医院信息系统安全风险评估研究[D].杭州:浙江大学,2022.
- [15] 曹伟.基于层次分析法的Z安防工程公司供应商评价研究[D].郑州:河南大学,2021.
- [16] 林晓娟.基于模糊综合评价法的长江口海水富营养化评价方法研究[D].厦门:厦门大学,2018.
- [17] 段宝彬.综合评价的模糊数学方法研究[D].南京:河海大学,2015.
- [18] 焦秋实.露天采石场防尘现状模糊综合评价研究[D].南京:江苏大学,2009.
- [19] 尹义超.东欢坨矿九煤层采空区自然发火规律研究[D].燕郊:华北科技学院,2019.
- [20] 马成龙.阳泉开元煤矿3#煤层瓦斯压力实测与分布规律研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
- [21] 张振飞.煤层瓦斯含量测定方法对比研究[D].淮南:安徽理工大学,2013.
- [22] 王玉丽.贵州低渗突出煤层瓦斯解吸及放散初速度试验研究[D].贵阳:贵州大学,2018.
- [23] 张帅,李昂.瓦斯放散初速率与煤的坚固性系数的相关特性研究[J].山西焦煤科技,2020,44(6):14-15+40.
- [24] 严家平,王定武.利用测井曲线判别煤的破坏类型及意义[J].东北煤炭技术,1999(3):50-53.
- [25] 赵发军,陈学习,刘彦伟.损失瓦斯量与煤的破坏类型关系研究[J].中国安全生产科学技术,2016,12(10):30-36.