

# 基于 AHP-DEMATEL 的煤与瓦斯突出危险性等级预测

代芳瑞<sup>1,2</sup>, 李希建<sup>2\*</sup>, 胡贝<sup>2</sup>, 汪圣伟<sup>2</sup>

(1. 贵州省疾病预防控制中心, 贵州 贵阳 550004; 2. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:**为提高煤层煤与瓦斯突出危险性评估结果的可靠性,结合层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)与决策试验与评价实验室方法(Decision-making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL)构建了煤与瓦斯突出危险性评估模型.从瓦斯因素、煤岩物理力学特性及地应力条件 3 个方面构建突出影响因素层次结构及判断矩阵,运用 DEMATEL 得到各影响因素的原因度、中心度、影响度及被影响度.研究表明:地质构造对其他因素影响度最高,其次是打钻时的动力现象及最大瓦斯压力;煤层厚度、煤层倾角受其他因素的影响比较明显;基于 AHP-DEMATEL 的煤与瓦斯突出预测结果与实际案例相符.

**关键词:**煤与瓦斯突出;突出危险性评估;层次分析法(AHP);决策试验与评价实验室(DEMATEL);影响因素  
**中图分类号:**TD713      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2022)04-0024-06

## Prediction of Coal and Gas Outburst Dangerous Grade Based on AHP-DEMATEL

DAI Fangrui<sup>1,2</sup>, LI Xijian<sup>2</sup>, HU Bei<sup>2</sup>, WANG Shengwei<sup>2</sup>

(1. Guizhou Center for Disease Control and Prevention, Guiyang 550004, China;

2. Mining College, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In order to improve the reliability of coal seam coal and gas prominence risk assessment results, combining Analytic Hierarchy Process (AHP) and Decision-making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) to construct a coal and gas prominence risk assessment model. A model for assessing the risk of gas protrusion is developed. A hierarchy of protrusion factors and a judgment matrix are constructed from three aspects, i.e. gas factors, physical and mechanical properties of coal rocks and ground stress conditions. The cause, center, influence and affected degrees of each factor are obtained by DEMATEL. The study shows that geological structure has the highest influence on other factors, the second is the dynamic phenomena when drilling and maximum gas pressure; coal seam inclination angle and coal seam thickness have more influence on coal and gas prominence. The prediction result of coal and gas prominence based on AHP-DEMATEL is consistent with the actual case.

**Keywords:** coal and gas outburst; outburst risk assessment; analytic hierarchy process (AHP); decision making trial and evaluation laboratory (DEMATEL); influencing factors

煤与瓦斯突出是在地应力和瓦斯共同作用下的一种异常动力灾害现象<sup>[1]</sup>.尽管采取了大量防治措施,但随着开采深度的增加,突出灾害危险日益加深<sup>[2]</sup>.煤与瓦斯突出受多种因素的控制,且其机理非常复杂.

收稿日期:2021-09-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874107);贵州省科技计划资助项目(黔科合平台人才[2018]5781号)

\*通信作者, E-mail:575914635@qq.com

高效准确预测煤与瓦斯突出主要影响因素、判断煤层突出危险等级已成为目前研究重点。

近年来,诸多学者对煤与瓦斯突出的研究取得了一定的成果.梁冰等<sup>[3]</sup>采用智能灰靶决策模型,量化了突出强度及危险程度;杨力等<sup>[4]</sup>建立了煤与瓦斯突出模糊支持向量机(Fuzzy Support Vector Machine, FSVM)预测模型,与支持向量机(Support Vector Machine, SVM)模型进行对比,提高了预测精度;兰泽全等<sup>[5]</sup>通过模糊综合评价法判别了4个矿井煤与瓦斯突出危险性,直观反映了各矿井突出危险程度;侯金玲等<sup>[6]</sup>基于模糊聚类分析方法确定了样本和模式的敏感度,在此基础上预测复杂煤层煤与瓦斯突出的危险程度;马晟翔等<sup>[7]</sup>将因子分析与BP神经网络结合预测煤与瓦斯突出,提高了数据处理效率.尽管上述研究可预测煤与瓦斯突出危险等级,但都较少考虑煤与瓦斯突出的主要致因之间的相互影响。

鉴于此,为预测煤与瓦斯突出危险性等级,笔者拟考虑瓦斯因素、煤岩物理力学特性及地应力条件,基于层次分析法(AHP)和决策试验与评价实验室法(DEMATEL),构建煤与瓦斯突出危险性等级预测模型,并验证其合理性.通过分析诱发煤与瓦斯突出各因素间的相互关系,得出煤与瓦斯突出发生的主要致因,以期得到更合理、更可靠的煤与瓦斯突出危险等级预测结果,为防治煤与瓦斯突出事故提供一定的技术参考。

## 1 建立 AHP-DEMATEL 模型

### 1.1 AHP 方法确定判断矩阵

1) 基于1~9标度法<sup>[8]</sup>构造判断矩阵 $A$ .判断矩阵中元素值 $a_{ij}$ 表示各元素之间相互影响程度.计算最大特征值 $\lambda_{\max}$ 及指标权重向量 $\omega_1$ .

2) 判断矩阵一致性检验.旨在检验评价指标权重分配合理性,一致性检验判断矩阵公式<sup>[9]</sup>为式(1).

$$C_a = \frac{\lambda_{\max} - n}{R_a(n - 1)}. \quad (1)$$

式中: $R_a$ 表示平均随机一致性指标; $n$ 表示比较指标个数; $C_a$ 表示一致性比例.当 $C_a < 0.1$ 时,即代表构建的判断矩阵满足要求.

### 1.2 DEMATEL 方法

DEMATEL 是将图论与矩阵相结合,对系统中所有影响因素综合分析的方法<sup>[10]</sup>,适用于判别系统中各因素之间相互影响程度及各自重要程度.

1) 确定直接影响矩阵 $D$ .根据系统中各因素影响程度不同对直接影响矩阵进行确定,表达式为<sup>[11]</sup>式(2).

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1j} & \vdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2j} & \vdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{i1} & d_{i2} & \cdots & d_{ij} & \vdots & d_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nj} & \vdots & d_{nn} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

2) 规范化直接影响矩阵.将矩阵 $D$ 按式(3)进行处理<sup>[12]</sup>,得到规范化直接影响矩阵 $E$ .

$$E = \frac{1}{\max(\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n d_{ij}, \max_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^n d_{ij})} D. \quad (3)$$

式中: $\max(\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n d_{ij}, \max_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^n d_{ij})$ 为直接影响矩阵中行和、列和的最大值.规范化处理后 $E$ 满足 $0 < E_{ij} < 1$ .

3) 计算综合影响矩阵 $T$ 、影响度 $f_i$ 、被影响度 $e_i$ .基于式(4)并利用 Matlab 软件可得综合影响矩阵 $T$ .在

综合影响矩阵  $T$  的元素  $t_{ij}$  基础上,利用式(5)、式(6)分别计算影响度  $f_i$  (某因素直接及间接影响其他因素的程度)及被影响度  $e_i$  (某因素被其它因素直接及间接影响的程度)<sup>[11]</sup>.

$$T = E + E^2 + \dots + E^n = \sum_{i=1}^n E^i \approx E(I - E)^{-1}; \quad (4)$$

$$f_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n); \quad (5)$$

$$e_i = \sum_{j=1}^n t_{ji} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (6)$$

式中:  $I$  为单位矩阵.

4) 计算各元素中心度  $m_i$  和原因度  $r_i$ . 中心度为影响度与被影响度之和,原因度  $r_i$  为影响度与被影响度之差.

$$m_i = f_i + e_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n); \quad (7)$$

$$r_i = f_i - e_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (8)$$

5) 确定影响权重  $\omega_2$ . 根据式(9)计算指标  $i$  的影响程度  $d_i$ , 利用式(10)规范化处理,得到影响权重  $\omega_2$ .

$$d_i = f_i e_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n); \quad (9)$$

$$\omega_{2i} = d_i / \sum_{i=1}^n d_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (10)$$

### 1.3 AHP-DEMATEL 预测模型

由于煤与瓦斯突出影响因素中同层指标之间的相互影响难以确定,因此将 AHP 的判断矩阵作为 DEMATEL 的直接影响矩阵,求得各评价指标中心度、影响度、原因度及被影响度.计算各指标综合权重  $\omega$ , 用于判断煤与瓦斯突出危险等级,表达式<sup>[13]</sup>为式(11).

$$\omega = \omega_{1i} \omega_{2i} / \sum_{i=1}^n \omega_{1i} \omega_{2i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (11)$$

## 2 煤与瓦斯突出致因相互影响分析

### 2.1 层次分析法确定判断矩阵

根据前人关于平顶山东矿区的研究<sup>[16-17]</sup>,影响该矿区煤与瓦斯突出的主要指标有最大瓦斯压力( $P$ )、最大钻孔瓦斯涌出初速度( $q$ )、打钻时动力现象( $G$ )、软分层厚度( $R$ )、煤层厚度( $M$ )、煤层倾角( $\alpha$ )、煤的最小坚固系数( $f$ )、最大开采深度( $H$ )和地质构造( $T$ ).选取以上9个因素作为煤与瓦斯突出发生的层次结构<sup>[15]</sup>,采用1~9标度法在9个因素中任选2个进行比较,由专家进行打分,建立煤与瓦斯突出影响因素判断矩阵,见表1.并采用式(1)对判断矩阵进行一致性检验.

表1 煤与瓦斯突出影响因素判断矩阵

影响因素	$P$	$q$	$G$	$R$	$M$	$\alpha$	$f$	$H$	$T$
$P$	1	2	1	2	8	7	3	5	1/2
$q$	1/2	1	1/2	2	7	6	3	4	1/3
$G$	1	2	1	2	8	7	3	5	1/2
$R$	1/2	1/2	1/2	1	6	5	2	3	1/4
$M$	1/8	1/7	1/8	1/6	1	1/2	1/5	1/3	1/9
$\alpha$	1/7	1/6	1/7	1/5	2	1	1/4	1/2	1/8
$f$	1/3	1/3	1/3	1/2	5	4	1	2	1/5
$H$	1/5	1/4	1/5	1/3	3	2	1/2	1	1/6
$T$	2	3	2	4	9	8	5	6	1

### 2.2 DEMATEL 确定影响度和被影响度

煤与瓦斯突出影响因素之间的关联程度以及反馈的主被动关系和程度由被影响度与影响度反映.以 AHP 的判断矩阵作为 DEMATEL 的直接影响矩阵,根据式(4)~式(6)可得二级评价指标的影响度  $f_i$  及被影响度  $e_i$ ,见图 1.

由图 1 可知:地质构造对其他因素的影响程度最大,企业应在生产前及生产过程中加强对地质条件的勘探及研究工作;煤层厚度、煤层倾角、最大开采深度受其他因素的影响较为明显,属于煤与瓦斯突出的薄弱环节.因此,在采掘之前应对煤层原始瓦斯压力、煤层厚度、煤层倾角等煤层参数作详细的了解,采掘过程中应加强对这些参数的动态监测,将这些参数控制在正常范围内.

### 2.3 中心度、原因度

中心度用于衡量该因素在煤与瓦斯突出系统中的重要程度,原因度用于衡量该因素和其他因素间的因果关系强弱.根据式(7)和式(8)计算煤与瓦斯突出影响因素的中心度及原因度,并依据计算结果构建煤与瓦斯突出影响因素的因果图,见图 2.

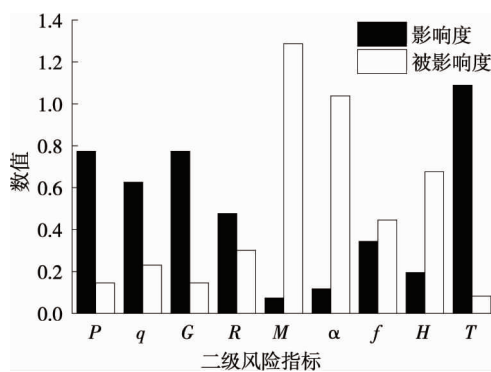


图 1 煤与瓦斯突出影响因素的影响度与被影响度

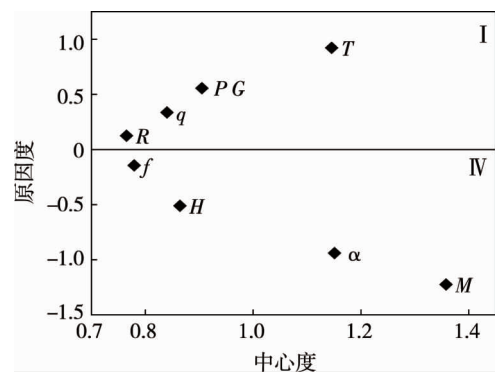


图 2 煤与瓦斯突出影响因素的因果结构

在图 2 中,位于 I 象限的因素属于结果类因素,位于 IV 象限的因素属于原因类因素,沿横坐标煤与瓦斯突出影响因素的重要程度逐渐增大.由此可知:地质构造、煤层倾角、煤层厚度具有较高的要度,是诱发煤与瓦斯突出发生的主要原因.因此,通过分析煤矿地质构造特征、煤层物理特性,就能大致预测煤与瓦斯突出分布规律<sup>[18-19]</sup>,综合各种手段,尽可能避免或降低煤与瓦斯突出危险性.

## 3 煤与瓦斯突出危险等级预测

### 3.1 AHP-DEMATEL 模型指标权重

运用 AHP 方法,得到二级指标初始权重见表 2,即  $\omega_1 = (0.175\ 2, 0.128\ 7, 0.175\ 2, 0.093\ 8, 0.017\ 7, 0.023\ 7, 0.063\ 2, 0.037\ 9, 0.284\ 6)$ .

表 2 煤与瓦斯突出影响因素及权重

目标层	一级指标	二级指标	二级指标权重
煤与瓦斯突出	瓦斯因素	最大瓦斯压力	0.175 2
		最大钻孔瓦斯涌出初速度	0.128 7
		打钻时的动力现象	0.175 2
	煤岩物理力学特性	软分层厚度	0.093 8
		煤层厚度	0.017 7
		煤层倾角	0.023 7
		煤的最小坚固系数	0.063 2
	地应力条件	最大开采深度	0.037 9
		地质构造	0.284 6

根据图1中煤与瓦斯突出影响因素的影响度和被影响度,按照式(9)和式(10)计算影响权重 $\omega_2 = (0.102\ 4, 0.131\ 3, 0.102\ 4, 0.130\ 6, 0.084\ 3, 0.109\ 0, 0.139\ 0, 0.119\ 0, 0.082\ 0)$ 。根据式(11)计算综合权重 $\omega = (0.169\ 7, 0.159\ 8, 0.169\ 7, 0.115\ 9, 0.014\ 1, 0.024\ 4, 0.083\ 1, 0.042\ 6, 0.220\ 6)$ 。

### 3.2 AHP-DEMATEL 危险等级预测结果

依照《防治煤与瓦斯突出细则》(2019版)<sup>[20]</sup>及前人研究成果<sup>[16]</sup>,将平顶山东矿区工作面煤与突出危险性等级分为3类,即一般突出危险、中等突出危险、严重突出危险, $N = \{N_1, N_2, N_3\}$ ,基于表3中煤与瓦斯突出影响因素与突出危险等级的关系,采用分级数方式将其转化为定量指标,并建立影响因素模糊隶属度矩阵 $R$ <sup>[15]</sup>。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0.48 & 0.52 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0.2 & 0.8 & 0 \end{bmatrix}$$

将综合权重 $\omega$ 与影响因素模糊隶属度矩阵 $R$ 相乘可得煤与瓦斯突出等级隶属度矩阵 $B$ <sup>[13]</sup>:

$$B = \omega R.$$

(12)

表3 影响因素与突出危险等级的关系<sup>[15,21]</sup>

指标名称	一般突出危险	中等突出危险	严重突出危险
最大瓦斯压力 $P/\text{MP}$	<1.1	1.1~3.0	$\geq 3.0$
最大钻孔瓦斯涌出速度 $q/(L \cdot \text{min}^{-1})$	<5	5~10	$\geq 10$
打钻时动力现象 $G$	$\leq 0.5$	0.5~1	1
软分层厚度比例 $R$	<0.1	0.1~0.3	$\geq 0.3$
煤层厚度 $M/\text{m}$	<3	3~5	$\geq 5$
煤层倾角变化 $\alpha/(\circ)$	$\leq 0.5$	0.5~1	1
煤的最小坚固系数 $f$	$\geq 1$	0.5~1	$\leq 0.5$
最大开采深度 $H/\text{m}$	<200	200~500	$\geq 500$
煤层地质构造 $T$	$\leq 0.5$	0.5~1	1

由式(12)得出隶属度矩阵 $B = [0.407\ 0, 0.351\ 4, 0.241\ 6]$ 。根据最大隶属度原则,取最大隶属度 $B_i = 0.407\ 0$ ,可判定该工作面为一般突出危险工作面,与实际发生煤与瓦斯突出危险等级相符,说明AHP-DEMATEL方法预测煤与瓦斯突出结果准确,该结果与文献[15]应用层次分析法结合模糊概率综合评价法所得研究结果一致,但计算过程更为简洁,且能更清晰地看到各影响因素间的相互影响关系,使煤与瓦斯突出预测更具针对性。

## 4 结论

1) 建立的AHP-DEMATEL煤与瓦斯突出危险性等级预测模型的预测结果与实际案例相符,并与模糊概率综合评价法所得结果一致。

2) 煤与瓦斯突出影响因素中,地质构造的影响度最大,其次是打钻时的动力现象及最大瓦斯压力;煤层厚度、煤层倾角受其他因素的影响比较明显。

## 参考文献:

- [1] 姜永东,郑权,刘浩,等.煤与瓦斯突出过程的能量分析[J].重庆大学学报,2013,36(7):98-101.
- [2] ZHAO Y, LIN B Q, LIU T, et al. Mechanism of multifield coupling-induced outburst in mining-disturbed coal seam[J]. Fuel, 2020, 272:117716.
- [3] 梁冰,秦冰,孙维吉,等.智能加权灰靶决策模型在煤与瓦斯突出危险评价中的应用[J].煤炭学报,2013,38(9):1611-1615.
- [4] 杨力,耿纪超,汪克亮.模糊支持向量机在煤与瓦斯突出预测中的研究[J].中国安全生产科学技术,2014,10(4):103-108.
- [5] 兰泽全,王志亮,张跃兵,等.煤与瓦斯突出危险性模糊综合评价方法研究[J].煤矿安全,2016,47(3):159-163.
- [6] 侯金玲.基于模糊聚类方法的复杂煤层煤与瓦斯突出危险性分析[J].煤矿安全,2017,48(6):160-163.
- [7] 马晟翔,李希建.基于因子分析与BP神经网络的煤与瓦斯突出预测[J].矿业安全与环保,2019,46(2):70-74.
- [8] LU L, SHI Z H, WEI Y, et al. Fuzzy analytic hiererehy process approach to eco-environmental vulnerability assessment for the Danjiangkou reservoir area China[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(23):3439-3447.
- [9] 陈刘瑜,李希建,毕娟,等.基于AHP-TOPSIS的冲击型煤与瓦斯突出倾向性预测[J].中国安全科学学报,2020,30(4):47-52.
- [10] YAO J, ZHAO J L, ZHANG M, et al. Microscopic flow simulation of shale gas based on lattice Boltzmann method[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(10):1280-1289.
- [11] 李新宏,韩子月,卢才武,等.老龄城镇油气管道失效风险评价方法[J].中国安全科学学报,2020,30(2):93-98.
- [12] 闵桂龙,端木京顺,高建国,等.基于模糊 DEMATEL 的航空维修安全管理体系研究[J].中国安全科学学报,2015,25(11):145-149.
- [13] 章光,武晓炜,胡少华,等.基于 AHP-DEMATEL 的混凝土重力坝健康诊断[J].安全与环境学报,2019,19(5):1489-1496.
- [14] 魏国营,王保军,闫江伟,等.平顶山八矿突出煤层瓦斯地质控制特征[J].煤炭学报,2015,40(3):555-561.
- [15] 亓新瑞.层次分析法和模糊概率相结合判定煤与瓦斯突出危险性[D].太原:太原理工大学,2012.
- [16] 郭德勇,范金志,马世志,等.煤与瓦斯突出预测层次分析-模糊综合评判方法[J].北京科技大学学报,2007,29(7):660-664.
- [17] 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(3):4-5.
- [18] 于美鲁,左宇军,潘超,等.逆断层倾角对煤与瓦斯突出影响的研究[J].煤矿安全,2017,48(11):171-174.
- [19] 高魁,乔国栋,刘健,等.构造复杂矿区煤与瓦斯突出瓦斯地质分析[J].中国安全科学报,2019,29(1):119-124.
- [20] 国家煤矿安全监察局.防治煤与瓦斯突出细则[M].北京:煤炭工业出版社,2019.
- [21] 念其锋,施式亮,李润求.基于网络分析和联系熵的煤与瓦斯突出预测研究[J].中国安全生产科学技术,2014,10(2):22-27.