

基于层次分析-模糊综合评价的 煤层透气性效果评价

郝旭

(中北大学信息商务学院,山西 晋中 030600)

摘要:矿井瓦斯治理是保障井下安全生产的重要一环,而增加煤层透气性可以有效提高瓦斯抽采效果。本文首先对矿井瓦斯多个抽采指标进行选择,然后通过层次分析法和模糊综合评价法进行了定性分析和定量计算,同时建立了适合矿井瓦斯抽采的指标体系和评价模型。依据对山西某煤矿的评价结果,将瓦斯抽采指标进行权重排列,为瓦斯抽采治理提供了依据。

关键词:透气性;抽采指标;层次分析法;模糊评价

中图分类号:TD441

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effect Evaluation of Coal Seam Permeability Based on Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Comprehensive Evaluation Method

HAO Xu

(College of Information and Business, North University of China, Jinzhong 030600, China)

Abstract: Gas control is an important part of ensuring safe production in mines. Increasing the permeability of coal seams can effectively improve the effect of gas drainage. The study first selected multiple indexes, conducted the qualitative analysis and quantitative calculation by the analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation method, and finally established the index system and evaluation model for the gas drainage. Based on the evaluation results on one coal mine in Shanxi, the gas drainage indexes were ranked by weight, which could provide a reference for gas extraction and control.

Key words: air permeability; drainage index; analytic hierarchy process; fuzzy evaluation

瓦斯抽采是维护矿井安全、预防瓦斯灾害最根本有效的技术措施。影响瓦斯抽采的两个主要因素包括:一是钻孔抽采工艺,但是仅仅改进抽采工艺对抽采效果的提高并不明显;二是煤层透气性,增加煤层透气性对瓦斯流动影响较为明显,可通过增大煤层透气性来提高瓦斯抽采效果^[1]。我国研究人员通过对低透气性煤层及具有煤与瓦斯突出危险煤层的瓦斯抽采技术效果进行研究和试验后,提出了关于增大低透气性煤层瓦斯抽采流量的方法和技术措施^[2],例如水力压裂煤体致裂增透技术^[3]、水力割缝

增透技术^[4]、高压旋转水射流割缝技术^[5]、深孔松动爆破技术^[6]和深孔聚能爆破增透技术^[7]等。

目前评价矿井煤层透气性的方法有层次分析法、灰色综合评价法、模糊综合评价法、多元统计法,以及人工神经网络评价法等^[8]。矿井瓦斯抽采具有模糊性大、不确定性因素多且动态变化的特点,可应用层次分析和模糊综合评价法对煤层透气性进行评价。其中层次分析-模糊综合评价法是一种将模糊综合评价法和层次分析法相结合的评价方法,是一种定性定量相结合的评价模型。该方法先用层次

* 收稿日期:2020-10-29

作者简介:郝旭(1990-),男,山西太原人,硕士,助教,从事煤层瓦斯抽采及危险化学品安全技术研究工作,E-mail:987040805@qq.com

分析法将评价因素集分成合理的若干层,确定各层评价因素的权重集,然后利用模糊数学原理将底层的各评价因素定量化,通过逐层的模糊合成,最终确定目标层的综合评价结果。两种方法相互融合相互补充,使目标的评价结果具有更高的可靠性^[9]。本文就是利用层次分析-模糊综合评价法对多个瓦斯抽采指标进行定性定量分析,并建立了相应的指标体系和评价模型。

1 瓦斯抽采指标体系的选取

煤层透气性是由多种因素决定的。一是地质因素,如煤层瓦斯压力、煤层瓦斯含量、煤层透气性等;二是钻孔本身因素,如钻孔的角度、孔深、孔径、钻场间距等;三是抽采因素,如封孔长度、抽采负压、抽采时间、抽采半径等^[10]。在这些因素中,有些指标是很明确的,但有些指标是模糊不清的,要想提高抽采率,就需要考虑到每个指标的影响和作用范围,从而综合考虑所有指标以期达到最优。

本文从上述三方面因素来分析影响煤层透气性的指标,按照层次分析-模糊综合评价法对抽采指标进行分层与评价^[11]。矿井瓦斯抽采指标的影响因素主要包括瓦斯原始赋存参数、钻孔布置参数和抽采参数三大方面:瓦斯原始赋存参数的影响因素主要有瓦斯压力、瓦斯含量和透气性系数;钻孔布置参数的影响因素主要有钻孔的角度、钻孔孔径、钻孔孔深、钻孔间距、封孔方法及长度;抽采参数的影响因素主要有抽采负压、抽采时间、抽采半径。

2 层次分析-模糊综合评价构造指标体系模型矩阵

2.1 瓦斯抽采指标权值计算

2.1.1 抽采指标体系第一层次评价指标权值

设瓦斯原始赋存参数 A_1 ,瓦斯抽采钻孔布置参数 A_2 ,瓦斯抽采参数影响因素 A_3 ,根据评价标度取值进行评价指标的重要性评价,指标权值计算如下:

$$1) \text{ 构造判断矩阵 } A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}.$$

2) 利用和积法计算最大特征根 λ_{\max} 。

a. 用和积法计算权值,首先按列归一化得:

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.57 & 0.4 \\ 0.25 & 0.29 & 0.4 \\ 0.25 & 0.14 & 0.2 \end{bmatrix},$$

然后再按行相加得和向量:

$$w_i = \begin{bmatrix} 1.49 \\ 0.94 \\ 0.59 \end{bmatrix};$$

将得到的和向量归一化即得权值向量:

$$\bar{w}_i = \begin{bmatrix} 0.49 \\ 0.31 \\ 0.20 \end{bmatrix},$$

即得各项权值为 $\bar{w}_1=0.49, \bar{w}_2=0.31, \bar{w}_3=0.20$ 。

b. 求最大特征根

$$[A \bar{w}_i]_i = \begin{bmatrix} 1 \times 0.49 + 2 \times 0.31 + 2 \times 0.20 \\ 1/2 \times 0.49 + 1 \times 0.31 + 2 \times 0.20 \\ 1/2 \times 0.49 + 1/2 \times 0.31 + 2 \times 0.20 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.51 \\ 0.955 \\ 0.6 \end{bmatrix};$$

$$\lambda_{\max} = [0.51/0.49 + 0.955/0.31 + 0.6/0.2]/3 = 3.074.$$

3) 进行一次校验:

$$I_C = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3.074 - 3}{3 - 1} = 0.037.$$

由平均随机一致性评价指标计算表可知当 $n=3$ 时, $I_R=0.52$, 则:

$$I_{CR} = \frac{I_C}{I_R} = \frac{0.037}{0.52} = 0.071 < 0.1.$$

所以判断矩阵的结果是可以接受的,求得的权值是可以使用的。

通过以上计算,归纳计算结果如表 1 所示。

表 1 抽采指标体系第一层次评价指标权值
Table 1 Level 1 evaluation index weights of the drainage index system

	A_1	A_2	A_3	\bar{w}_i	λ_{\max}	I_{CR}
A_1	1	2	2	0.49	3.074	0.071
A_2	1/2	1	2	0.31		
A_3	1/2	1/2	1	0.20		

2.1.2 抽采指标体系第二层次评价指标权值

瓦斯原始赋存参数、瓦斯钻孔布置参数和瓦斯抽采参数影响因素的第二层次评价指标的计算如下。

1) 瓦斯原始赋存参数指标权值的计算结果如表 2 所示。

表 2 瓦斯原始赋存参数指标权值
Table 2 Index weights of gas original occurrence parameters

评价矩阵 A_1	A_{11}	A_{12}	A_{13}	\bar{w}_i	λ_{\max}	I_{CR}
A_{11}	1	1/3	1/3	0.23	3.021	0.020
A_{12}	2	1	1/3	0.47		
A_{13}	1/3	1/3	1	0.30		

2) 瓦斯钻孔布置参数指标权值的计算结果如表

3 所示。

表 3 瓦斯钻孔布置参数指标权值
Table 3 Index weights of gas drilling layout parameters

评价矩阵 A_2	A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{24}	A_{25}	\bar{w}_i	λ_{max}	I_{CR}
A_{21}	1	1/3	1	1/4	1/5	0.20	5.019 2	0.004 3
A_{22}	1/3	1	1/4	1/5	1/4	0.17		
A_{23}	1	1/4	1	1/4	1	0.25		
A_{24}	1/4	1/5	1/4	1	1/3	0.17		
A_{25}	1/5	1/4	1	1/3	1	0.20		

3) 瓦斯抽采参数影响因素指标权值的计算结果如表 4 所示。

表 4 瓦斯抽采参数影响因素指标权值
Table 4 Index weights of influencing factors of gas drainage parameters

评价矩阵 A_3	A_{31}	A_{32}	A_{33}	\bar{w}_i	λ_{max}	I_{CR}
A_{31}	1	1/3	1/3	0.23	3.021	0.020
A_{32}	2	1	1/3	0.47		
A_{33}	1/3	1/3	1	0.30		

2.2 模糊综合评价指标体系模型

1) 利用模糊综合方法定性评价部分因素。

以抽采参数影响因素为例,首先确定抽采参数影响因素集 $U = \{ \text{抽采负压}(u_1), \text{抽采时间}(u_2), \text{抽采半径}(u_3) \}$;其次确立评价抽采参数影响因素的评语集 $\{ \text{重要}(v_1), \text{比较重要}(v_2), \text{不太重要}(v_3), \text{不重要}(v_4) \}$ 。

2) 确定模糊综合评价的隶属度。

将指标分值的取值范围定为 $[0, 1]$,评价结果属于哪份隶属度可以采用统计的方法来确定。对瓦斯原始赋存参数 A_1 进行模糊化,结果如表 5 所示。

表 5 专家评价表
Table 5 Expert evaluation

等级	不重要	不太重要	比较重要	重要
分数	0	0.6	0.8	1.0
频数	0/10	1/10	7/10	2/10

由上表得出其模糊评价并进行归一化得:

$$A'_1 = \begin{pmatrix} u_1 & u_2 & u_3 & u_4 \\ 0 & 0.073 & 0.683 & 0.244 \end{pmatrix}$$

3) 确定模糊综合评价的隶属函数。

同样以影响瓦斯抽采参数的因素为例,可以首先将 0 和 1 两个值模糊化,应用模糊综合评价对参数指标进行分析。利用专家所打分数的频数与相对应的分值相乘,进行归一化。

3 应用实例

本报告选用山西某煤矿 3 号煤层 +470 m 水平开采范围作为瓦斯抽采指标体系综合评价的应用实

例。根据本文应用层次分析-模糊综合评价方法提出的瓦斯抽采指标体系模型进行分析和试验,主要是从瓦斯赋存参数 A_1 、钻孔布置参数 A_2 及抽采参数 A_3 三方面进行综合评价。

本煤层厚度的范围为 5.30~7.15 m。预测瓦斯绝对涌出量为 297.98 m³/min,相对涌出量为 23.60 m³/t,属于高瓦斯矿井。煤层的透气性系数为 0.060 5~0.120 9 m²/(MPa²·d),瓦斯压力为 0.05~0.17 MPa。运用多级孔板流量计依次对各试验抽采孔和对比试验孔的瓦斯流量进行共 20 d 的测定。

3.1 综合评价瓦斯抽采指标体系

山西某煤矿抽采系统指标赋值情况,如表 6 所示。

表 6 山西某煤矿瓦斯抽采指标体系赋值表
Table 6 Assignment table for gas drainage index system in one mine in Shanxi

一级指标	二级指标	权值	二级得分	一级得分
瓦斯原始赋存参数指标 0.49	瓦斯压力	一票否决	1	0.80
	瓦斯含量	一票否决	1	
	透气性系数	1	0.80	
钻孔布置参数指标 0.31	钻孔孔径	0.20	0.90	0.93
	钻孔角度	0.17	0.95	
	钻孔孔距	0.25	0.94	
	钻孔间距	0.17	0.95	
	封孔方法及长度	0.20	0.94	
抽采参数影响因素指标 0.20	抽采负压	0.23	0.95	0.94
	抽采时间	0.47	0.95	
	抽采半径	0.30	0.94	

3.2 瓦斯抽采指标体系的模糊综合评价

3.2.1 模糊综合评价检查表

挑选 20 名人员(10 名安全评价专家、5 名煤矿安全管理人员和 5 名矿井施工人员)对山西某煤矿瓦斯抽采指标体系按照评价检查表进行打分,打分给出的综合判定结果如表 7 所示。

表 7 山西某煤矿瓦斯抽采指标评价等级表
Table 7 Rating table for Gas drainage index system in one coal mine in Shanxi

一级指标	二级评价指标	权值	评价等级			
			1	2	3	4
瓦斯原始赋存参数指标 0.49	瓦斯压力	一票否决	4	10	6	0
	瓦斯含量	一票否决	2	6	12	0
	透气性系数	1	0	6	12	2
钻孔布置参数指标 0.31	钻孔孔径	0.20	6	12	2	0
	钻孔角度	0.17	2	14	4	0
	钻孔孔深	0.25	16	4	0	0
	钻孔间距	0.17	14	6	0	0
	封孔方法及长度	0.20	14	4	6	0
抽采参数影响因素指标 0.20	抽采负压	0.23	10	4	6	0
	抽采时间	0.47	6	10	4	0
	抽采半径	0.30	12	6	2	0

3.2.2 模糊综合评价计算

1) 瓦斯赋存参数指标模糊综合评价。

单因素评价矩阵瓦斯压力 $R_{11}=[0.2\ 0.5\ 0.3\ 0]$, 瓦斯含量 $R_{12}=[0.1\ 0.3\ 0.6\ 0]$, 透气性系数 $R_{13}=[0.0.3\ 0.6\ 0.1]$.

对瓦斯压力 A_{11} 、瓦斯含量 A_{12} 、透气性系数 A_{13} ,按前面层次分析法中得到的 \bar{w}_i 作为重要程度分别赋值为 0.23,0.47 和 0.30,则:

$$B_1 = A_{11} \times R_{11} + A_{12} \times R_{12} + A_{13} \times R_{13} = 0.23 \times [0.2\ 0.5\ 0.3\ 0] + 0.47 \times [0.1\ 0.3\ 0.6\ 0] + 0.30 \times [0.0.3\ 0.6\ 0.1] = (0.093\ 0.346\ 0.531\ 0.030).$$

2) 钻孔布置参数指标模糊综合评价。

$$\text{单因素评价矩阵 } R_2 = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.6 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.7 & 0.2 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 \end{pmatrix};$$

单项评价矩阵 $B_2 = A_2 \times R_2 = (0.476\ 0.260\ 0.054\ 0)$.

3) 瓦斯抽采参数指标模糊综合评价。

$$\text{单因素评价矩阵 } R_3 = \begin{pmatrix} 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.1 & 0.1 & 0 \end{pmatrix};$$

单项评价矩阵 $B_3 = A_3 \times R_3 = (0.871\ 0.076\ 0.053\ 0)$.

4) 整理总评价矩阵。

$$B = A \times R = (A_1\ A_2\ A_3) \times \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{pmatrix} =$$

$(0.37\ 0.27\ 0.29\ 0.01)$,

即模糊综合评价结果

$$F = \begin{pmatrix} \text{重要} & \text{较重要} & \text{一般} & \text{不重要} \\ 0.37 & 0.27 & 0.29 & 0.01 \end{pmatrix}.$$

通过上述结果可以得出,煤矿瓦斯抽采指标体系整体属于重要的结论。

3.3 瓦斯抽采参数指标的重要度计算

瓦斯赋存参数重要度计算:

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.3 \\ 0.3 & 0.6 & 0.6 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{pmatrix};$$

$$A_1 = (0.3 \times 1, 1.1 \times 0.8, 1.5 \times 0.6, 0) = (0.3, 0.88, 0.9, 0).$$

进行归一化得 $A_1 = (0.144, 0.423, 0.433, 0)$,

$$B_1 = A_1 \times R_1 = (0.360\ 2, 0.401\ 1, 0.386\ 7).$$

因此,瓦斯压力、瓦斯含量、透气性系数三个指标的隶属值分别为 0.360 2,0.401 1,0.386 7。然后分别乘以权重得出结果为 $B_1' = (0.108\ 06, 0.160\ 44, 0.116\ 01)$.

同理 $B_2' = (0.079\ 4, 0.054\ 6, 0.135\ 2, 0.088\ 1, 0.097\ 5)$; $B_3' = (0.086\ 97, 0.077\ 11, 0.130\ 79)$.

因此,得出了瓦斯抽采指标体系的优选重要度,如表 8 所示。

表 8 瓦斯抽采指标体系重要度

Table 8 Importance of gas drainage index system

指标名称	瓦斯压力	瓦斯含量	透气性系数	钻孔孔径	钻孔角度	钻孔孔深	钻孔间距	封孔方法长度	抽采负压	抽采时间	抽采半径
重要度	0.108 1	0.160 4	0.116 0	0.079 4	0.054 6	0.135 2	0.088 1	0.097 5	0.087 0	0.077 1	0.130 8
排名	5	1	4	9	11	2	7	6	8	10	3

从结果得到瓦斯抽采指标重要度的顺序为:瓦斯含量>钻孔孔深>抽采半径>透气性系数>瓦斯压力>封孔方法及长度>钻孔间距>抽采负压>钻孔孔径>抽采时间>钻孔角度。这一结果将为以后现场的瓦斯抽采工作提供参考和依据。

4 结论

本文通过对矿井瓦斯抽采和煤层透气性的影响因素进行分析和优选,建立了比较全面的瓦斯抽采指标体系及评价模型,同时在山西某煤矿进行了现场试验。通过研究得出以下结论:

1) 增加煤层透气性可以很好地提高瓦斯抽采效

果,确定了瓦斯抽采指标体系包含瓦斯原始赋存、钻孔布置和抽采参数等三方面因素。

2) 采用层次分析-模糊综合评价法对建立的瓦斯抽采指标体系进行了定性-定量-一定性的分析。层次分析法得到了瓦斯抽采指标体系中各指标的权值,并通过了一致性检验。模糊综合评价法通过建立因素集和评价矩阵,得到了评价的隶属度和重要度,得出了瓦斯抽采指标体系整体属于重要的结论。

3) 通过山西某煤矿瓦斯抽采的具体试验,对建立的瓦斯抽采指标体系优选模型进行了综合评价,得到了瓦斯抽采指标重要度的顺序,验证了矿井瓦斯抽采指标体系优选的合理性,研究结果为今后现

场的瓦斯抽采工作提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 邓书军,杨聘卿.高瓦斯低透气性坚硬煤层机械造穴泄压增透技术研究[J].煤炭技术,2020,39(6):126-128.
DENG S J, YANG P Q. Mechanical cavitation for high gas and low permeability hard coal seams research on pressure relief and antireflection technology[J]. Coal Technology, 2020, 39(6): 126-128.
- [2] 俞启香.矿井瓦斯治理[M].徐州:中国矿业大学出版社,1992.
- [3] 孙炳兴,王兆丰,伍厚荣.水力压裂增透技术在瓦斯抽采中的应用[J].煤炭科学技术,2010,38(11):78-80.
SUN B X, WANG Z F, WU H R. Hydraulic pressurized cracking and permeability improvement technology applied to gas drainage[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(11): 78-80.
- [4] 李桂波,冯增朝,王彦琪,等.高瓦斯低透气性煤层不同瓦斯抽采方式的研究[J].地下空间与工程学报,2015,11(5):1362-1366.
LI G B, FENG Z C, WANG Y Q, et al. The study of different gas extraction methods in high gas and low permeability coal seam[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(5): 1362-1366.
- [5] 王宁博,林柏泉,高亚斌,等.高突煤层底板穿层割缝钻孔优化设计及应用[J].煤炭科学技术,2015,43(5):62-66.
WANG N B, LIN B Q, GAO Y B, et al. Optimized design and application of borehole slotting drilling through floor of high outburst seam[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(5): 62-66.
- [6] 戴广龙,宋贤生.高瓦斯低透性煤层深孔松动爆破卸压增透影响参数的数值模拟[J].建井技术,2003(6):14-17.
DAI G L, SONG X S. Digital simulation on influence parameter of deep standing blasting in high gassy low permeability seam to pressure releasing and permeability improving[J]. Mine Construction Technology, 2003(6): 14-17.
- [7] 商登莹,吕鹏飞,于学洋,等.低透气性煤层深孔聚能爆破增透技术及实践[J].煤炭科学技术,2012,40(12):48-51.
SHANG D Y, LÜ P F, YU X Y, et al. Permeability improved technology and practices with deep borehole energy accumulation blasting in low permeability seam[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(12): 48-51.
- [8] 焦姍,侯晓晖,武国辉.基于AHP法的阳城县矿山地质环境质量评价[J].山西煤炭,2018,38(1):31-34.
JIAO S, HOU X H, WU G H. Quality evaluation of mine geological environment in yang cheng county based on AHP method [J]. Shanxi Coal, 2018, 38(1): 31-34.
- [9] 崔怀鹏,武俊峰,梁燕华.基于层次分析法的冲击地压模糊综合评价[J].科学技术与工程,2019,19(26):136-140.
CUI H P, WU J F, LIANG Y H. Fuzzy comprehensive evaluation of rock burst based on analytic hierarchy process[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(26): 136-140.
- [10] 李树刚,程皓,潘红宇,等.崔家沟煤矿采空区瓦斯抽采效果评价模型[J].西安科技大学学报,2020,40(1):11-17.
LI S G, CHENG H, PAN H Y, et al. Evaluation model of gas drainage effect in goaf of Cuijiagou coal mine[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(1): 11-17.
- [11] 刘捷.基于AHP模型的矿井瓦斯抽采现状评价体系研究[J].山西煤炭,2015,35(1):6-7.
LIU J. On evaluation system of gas drainage in mines based on AHP model[J]. Shanxi Coal, 2015, 35(1): 6-7.

(编辑:安娜)