

# 基于组合赋权法和响应面法的竖井支护参数优化研究<sup>①</sup>

刘超<sup>1</sup>, 祁贇朴<sup>1</sup>, 宋章伦<sup>1</sup>, 王亮<sup>1</sup>, 曹定洋<sup>2</sup>, 陈大鹏<sup>2</sup>

(1.北方矿业有限责任公司,北京 100053; 2.北京科技大学土木与资源工程学院,北京 100083)

**摘要:**针对刚果(金)科米卡矿业卡莫亚铜钴矿副井开拓建设工程中支护参数优选问题,结合工程地质条件,采用 Box-Behnken 方法设计了 25 组试验方案。应用 FLAC<sup>3D</sup> 进行数值分析,获得了不同支护参数条件下的力学响应特征,结合技术经济要求,选取开拓成本、最大拉应力等 9 个指标,利用层次分析法及主成分分析法组合赋权各评价指标,提出了竖井支护参数综合评价模型。以规范化综合评分为响应指标、竖井支护参数为变量,构建了多元二阶回归预测方程。结果表明,竖井支护优化参数为:水平方向锚杆根数 35、锚杆垂直方向间距 1 m、锚杆长度 2.5 m、衬砌混凝土强度等级 C35,此时综合效益最大。

**关键词:** 响应面法; 层次分析法; 主成分分析法; 竖井; 支护; 优化

中图分类号: TD323

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.02.004

文章编号: 0253-6099(2023)02-0016-05

## Parameter Optimization for Shaft Support Based on Combined Weighting and Response Surface Methodology

LIU Chao<sup>1</sup>, QI Yunpu<sup>1</sup>, SONG Zhanglun<sup>1</sup>, WANG Liang<sup>1</sup>, CAO Dingyang<sup>2</sup>, CHEN Dapeng<sup>2</sup>

(1. North Mining Co Ltd, Beijing 100053, China; 2. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** For determining support parameters in an advancement project of the secondary shaft of Comica Mining's Kamoya copper-cobalt mine in the DRC, 25 sets of testing schemes were designed by using Box-Behnken based on the engineering geological conditions. After numerical analysis with FLAC<sup>3D</sup>, the mechanical response characteristics under various support conditions were obtained. In combination with technical and economic requirement, analysis hierarchy process and principal component analysis were adopted for the combined weighting of nine selected indices, including advancement cost, maximum tensile stress among others, and then a comprehensive evaluating model was established for the parameters of shaft support. A multivariate second-order regression prediction equation was then obtained with the comprehensive scores as response indicators, and shaft support parameters as the variables. It is found that shaft is supported with 35 anchor bolts with thread length of 2.5 m arranged in horizontal direction, with spacing of 1 m in vertical direction, as well as the concrete lining with strength grade of C35, and the best comprehensive benefits can be obtained.

**Key words:** response surface methodology; analysis hierarchy process (AHP); principal component analysis (PCA); shaft; support; optimization

竖井是矿山工程的“咽喉要道”,合理的支护参数是保证竖井安全稳定运行的前提。随着开采深度不断增加,竖井开凿难度也将越来越大。针对竖井支护参数优化问题,诸多学者采用敏感性分析<sup>[1]</sup>、数值模拟及可靠度计算<sup>[2-3]</sup>等方法分别对多种影响因素单独开展研究,并取得了良好的参数优化效果。然而,在地质

情况复杂多变的软破岩体开凿竖井时,采用单一的评价指标难以满足安全和技术经济要求。组合赋权方法能够综合主客观赋权优势,为多指标评价提供了一种新的途径,目前已成功应用于环境评价<sup>[4]</sup>、岩体与采场稳定性分析<sup>[5-8]</sup>、电子商务<sup>[9]</sup>等多个领域。

层次分析法(AHP)可简化系统分析并使决策者

① 收稿日期: 2022-10-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52034001); 高等学校学科创新引智计划(B20041)

作者简介: 刘超(1986—),男,山东菏泽人,博士,高级工程师,主要从事地下矿山开采和充填相关工作。

思维过程保持一致性<sup>[10-11]</sup>。主成分分析法(PCA)作为客观赋权方法,采用主成分表征原始数据,使问题变得比较简单、直观,而且这些较少的综合指标之间互不相关<sup>[12]</sup>。响应面法通过构造一阶或高阶回归模型来表达隐式功能函数,寻找试验指标与各因子间的定量规律,确定各因子水平的最佳组合<sup>[13]</sup>。本文基于 AHP 与 PCA 对井筒支护参数评价指标进行组合赋权,建立竖井支护综合评价模型,并采用响应面法确定最佳支护结构,极大提高了井筒结构参数优化程度和结果可信度。

## 1 层次分析法-主成分分析综合评价模型

### 1.1 评价指标层次构建

为经济、合理评价竖井支护结构稳定性,选取衬砌最大拉应力、最大压应力、最大剪应力、最大水平位移、最大下沉位移、井筒收敛量、塑性区体积、开拓成本、施工效率等 9 个指标作为竖井结构参数优选的评价指标,以安全、经济、技术三方面为准则构建评价分析层次结构,如图 1 所示。

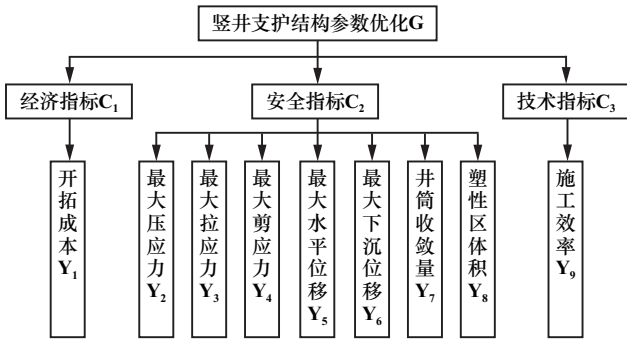


图 1 竖井支护参数评价层次结构

### 1.2 判断矩阵构造及一致性检验

#### 1.2.1 层次单排序

根据判断矩阵标度方法,构造准则层  $C_1 \sim C_3$  对目标层  $G$ 、指标层  $Y_2 \sim Y_8$  对准则层  $C_2$  的判断矩阵  $G$ 、 $C$ 。

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 2 \\ 3 & 1 & 6 \\ 1/2 & 1/6 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 1/4 & 1/2 & 1/2 & 1/8 & 1/4 \\ 2 & 1 & 1/2 & 1 & 1 & 1/4 & 1/2 \\ 4 & 2 & 1 & 2 & 2 & 1/2 & 1 \\ 2 & 1 & 1/2 & 1 & 1 & 1/4 & 1/2 \\ 2 & 1 & 1/2 & 1 & 1 & 1/4 & 1/2 \\ 8 & 4 & 2 & 4 & 4 & 1 & 2 \\ 4 & 2 & 1 & 2 & 2 & 1/2 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

判断矩阵  $G$  的最大特征值  $\lambda_{\max 1} = 3$ , 相应的特征向量为:

$$W = (0.222, 0.667, 0.111)^T \quad (3)$$

判断矩阵  $C$  的最大特征值  $\lambda_{\max 2} = 7$ , 相应的特征向量为:

$$W = (0.043, 0.087, 0.174, 0.087, 0.087, 0.348, 0.174)^T \quad (4)$$

为避免主观性和片面性,对上述判断矩阵进行一致性检验。经计算,矩阵  $G$ 、 $C$  的随机一致性比例分别为  $C_{R1} = 0 < 0.1$ 、 $C_{R2} = 0 < 0.1$ 。因此,两判断矩阵通过一致性检验。

#### 1.2.2 层次总排序

根据层次单排序所获特征向量计算指标  $Y_i$  对目标层  $G$  的相对重要性权重  $\omega_i$ , 结果如表 1 所示。

表 1 竖井支护参数评价指标层次总排序

指标层	目标层			权重 $\omega_i$
	$C_1$ 0.222	$C_2$ 0.667	$C_3$ 0.111	
$Y_1$	1			0.222
$Y_2$		0.043		0.029
$Y_3$		0.087		0.058
$Y_4$		0.174		0.116
$Y_5$		0.087		0.058
$Y_6$		0.087		0.058
$Y_7$		0.348		0.232
$Y_8$		0.174		0.116
$Y_9$			1	0.111

#### 1.2.3 主要评价指标筛选

为辨识不同指标对竖井支护效果评价的敏感性,采用主成分分析法(PCA)对评价指标分类并根据主成分贡献率确定对应评价指标客观权重。

1) 对样本数据进行中心化处理。对于给定样本点  $(v_1, v_2, \dots, v_n)$ , 中心化过程为:

$$\{x_1, x_2, \dots, x_n\} = \{v_1 - \mu, v_2 - \mu, \dots, v_n - \mu\} \quad (5)$$

式中  $\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$ ,  $x_i$ 、 $v_i$  均为列向量。

2) 求样本协方差矩阵。向量  $x_i$  在  $\omega$  (单位方向向量) 上的投影坐标为  $x_i^T \omega$ , 主成分分析目标是寻找一个投影方向  $\omega$ , 使样本  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  在  $\omega$  方向上投影的方差最大。样本投影后的方差即协方差矩阵为:

$$D(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^T \omega)^2 = \omega^T \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i x_i^T \right) \omega \quad (6)$$

3) 求解协方差矩阵特征值及特征向量, 并取前  $d$  大特征值对应特征向量作为投影轴, 获取样本数据主成分:

$$x'_i = \begin{pmatrix} \omega_1^T x_i \\ \omega_2^T x_i \\ \vdots \\ \omega_d^T x_i \end{pmatrix} \quad (7)$$

### 1.3 竖井支护参数优化综合评价模型

依据主要指标筛选确定的主成分特征值,计算各主成分相对原始数据的信息占比 $\eta_j$ (第 $j$ 主成分信息占比):

$$\eta_j = \frac{\lambda_j^2}{\sum_{i=1}^n \lambda_i^2} \quad (8)$$

结合层次分析法确定的各评价指标权重,计算样本数据综合得分,并对综合得分进行规范化处理:

$$F_i = \sum_{j=1}^d (\omega_j^T x_i \cdot \eta_j \cdot P_j) \quad (9)$$

$$Z_i = \frac{F_i - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}} \quad (10)$$

式中 $F_i$ 为样本数据 $i$ 的综合评分; $\omega_j^T x_i$ 为样本数据 $i$ 在第 $j$ 主成分对应特征向量上的投影坐标; $P_j$ 为第 $j$ 主成分内各指标在层次分析中的总权重; $Z_i$ 为样本数据 $i$ 的规范化综合评分; $F_{\max}$ 、 $F_{\min}$ 分别为规范化综合评分最大值、最小值。

## 2 工程应用

### 2.1 工程概况

卡莫亚铜钴矿区位于赞比亚-刚果(金)铜矿带的西北部、加丹加弧形铜钴成矿带的中西部,为非洲中部多金属成矿带卢弗利昂(Lufilian)弧形构造带北西段的转折部分(东西转向北西)。矿体赋存于“卡莫亚-坎博韦推覆体”内,推覆体东西向展布,由多个菱形块体及块体间充填物组成。在逆冲推覆运动过程中,由于推覆体内应力分布不均匀、岩石硬度不均匀,再加之推覆间歇期中的惯性制动,推覆体被撕裂形成多个大小不一、产状不同的不规则“次级地质体”。撕裂过程中这些菱形块体之间形成非常不规则的断裂构造,同时在推覆过程中受应力作用,菱形块体内部亦形成复杂的褶皱、断裂构造。

副井围岩在断裂、岩浆侵入、风化、地下水侵蚀溶蚀等多种内外地质营力作用下受到不同程度的破坏。根据工勘报告,副井围岩基本质量等级划分大致可分为以下两大段:

1) 风化及破裂角砾岩、构造角砾岩段(0~313.7 m), RQD 值为 41.82, 围岩类别为 IV~V 类, 不稳定, 一般自稳时间数小时至 1 个月, 主要易出现坍塌、侧壁失稳、片帮、掉块现象。

2) 粉砂岩(Ks1.3)完整段(313.7~500 m), RQD 值为 86.67, 围岩类别为 II 类, 稳定性强, 持续稳定数月以上, 局部有小掉块。

### 2.2 三维数值模型建立

井筒直径 7.5 m, 井口标高 1 408.800 m, 井底标高 912 m, 井座设置在井口下 34 m 处岩层较稳定区域。依据 Saint Venant 原理确定副井开挖局部效应的影响区为井筒水平尺寸的 3~5 倍, 为确保模拟准确性, 根据副井井筒直径 7.5 m 和研究范围深度确定模型几何尺寸为长×宽×高=150 m×150 m×559 m, 模型平面如图 2 所示。

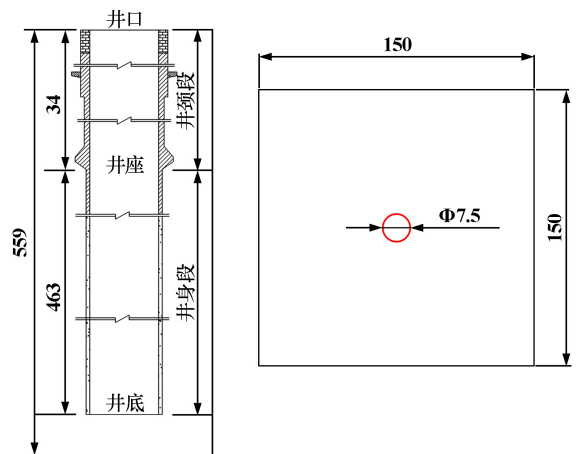


图 2 模型平面示意图(单位:m)

本次数值计算以井筒为中心,主要研究副井深度范围 850~1 410 m, 模型节点数为 166 6814, 单元数为 2 136 097, 模型三维实体与网格见图 3。

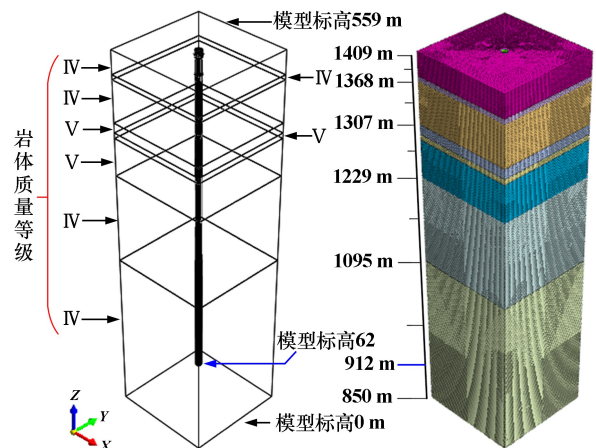


图 3 数值计算模型

### 2.3 岩体力学参数选取

根据地质资料,井筒围岩主要为角砾岩、粉砂岩及断层泥,同时考虑不同支护结构设计的混凝土强度等级,拟选用表 2 和表 3 所示的参数开展数值模拟。

表 2 数值计算参数

材料类别	容重/ (kg · m <sup>-3</sup> )	内聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比
角砾岩Ⅳ级	2 450.00	0.500	26.62	0.037	0.380	0.33
角砾岩Ⅴ级	2 250.00	0.200	21.62	0.024	0.326	0.40
粉砂岩	2 670.00	1.103	38.66	0.548	4.728	0.22
C35 混凝土	2 260.00	3.500	46.50	1.570	31.500	0.20
C30 混凝土	2 240.00	3.180	45.90	1.430	30.000	0.20
C25 混凝土	2 220.00	2.700	45.00	1.270	28.000	0.20
C15 混凝土	2 180.00	2.400	44.50	0.910	22.000	0.20
断层泥	2 000.00	0.100	18.00	0	0.012	0.45

表 3 锚杆力学参数

横截面积/ m <sup>2</sup>	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ N	单位长度上水泥浆 刚度/MPa
$3.14 \times 10^{-4}$	$2.00 \times 10^2$	$1.00 \times 10^{10}$	7.00
水泥浆外圈周长/ m	水泥浆摩擦角/ (°)	单位长度上水泥浆 黏结力/N	
$9.42 \times 10^{-2}$	25	70	

## 2.4 Box-Behnken Design 响应面优化试验设计

根据矿区地质情况、竖井结构及围岩物理力学参数等,设计了 4 因素 3 水平试验,见表 4。

表 4 响应面分析试验因素水平表

水平	因素			
	A 锚杆水平方向 数量/根	B 锚杆垂直方向 间距/m	C 锚杆 长度/m	D 衬砌混凝土 强度等级
-1	15	1	1.50	C15
0	25	2	2.00	C25
1	35	3	2.50	C35

## 2.5 试验结果

通过对 25 组方案进行数值模拟试验,考虑不同支护方案的开拓成本及施工效率,并将各方案 Y1 ~ Y9 值作为井筒稳定性评价指标,结果如表 5 所示。

表 5 Box-Behnken 试验设计及结果

方案	A	B	C	D	Y <sub>1</sub> /(元 · m <sup>-3</sup> )	Y <sub>2</sub> /MPa	Y <sub>3</sub> /MPa	Y <sub>4</sub> /MPa	Y <sub>5</sub> /m	Y <sub>6</sub> /m	Y <sub>7</sub> /m	Y <sub>8</sub> /m <sup>3</sup>	Y <sub>9</sub> /(m · d <sup>-1</sup> )
1	-1	-1	0	0	2 100	21.85	0.30	10.10	0.58	0.25	1.03	140	2.00
2	1	-1	0	0	2 900	21.95	0.30	10.13	0.54	0.25	0.98	110	1.00
3	-1	1	0	0	1 700	21.82	0.31	10.09	0.60	0.25	1.05	130	3.00
4	1	1	0	0	1 500	21.91	0.36	10.12	0.59	0.26	1.04	170	2.00
5	0	0	-1	-1	1 400	18.31	0.30	8.50	0.58	0.23	1.03	80	3.00
6	0	0	1	-1	1 600	18.27	0.29	8.47	0.57	0.23	1.00	90	3.00
7	0	0	-1	1	2 400	27.55	0.49	12.93	0.52	0.24	0.91	110	3.00
8	0	0	1	1	2 600	27.44	0.45	12.90	0.50	0.24	0.88	110	3.00
9	-1	0	0	-1	1 300	18.20	0.30	8.44	0.60	0.24	1.05	80	3.50
10	1	0	0	-1	1 900	18.22	0.30	8.45	0.57	0.23	1.02	110	1.50
11	-1	0	0	1	2 300	27.74	0.55	13.02	0.52	0.24	0.91	90	2.50
12	1	0	0	1	2 700	27.42	0.43	12.87	0.51	0.24	0.97	100	1.50
13	0	-1	-1	0	2 400	21.76	0.30	10.06	0.57	0.25	1.01	100	1.50
14	0	1	-1	0	1 800	21.76	0.38	10.06	0.59	0.26	1.04	100	3.00
15	0	-1	1	0	2 600	21.70	0.31	10.04	0.55	0.25	0.99	130	1.50
16	0	1	1	0	1 900	21.77	0.33	10.06	0.58	0.25	1.02	110	3.00
17	-1	0	-1	0	1 800	21.82	0.35	10.09	0.59	0.26	1.05	120	3.50
18	1	0	-1	0	2 100	21.76	0.39	10.06	0.58	0.25	1.03	130	1.50
19	-1	0	1	0	1 800	21.78	0.36	10.06	0.59	0.24	1.03	150	3.50
20	1	0	1	0	2 300	21.80	0.30	10.08	0.56	0.25	1.00	150	1.50
21	0	-1	0	-1	2 100	18.21	0.29	8.45	0.56	0.24	1.00	70	1.50
22	0	1	0	-1	1 300	18.26	0.30	8.47	0.59	0.24	1.04	50	3.00
23	0	-1	0	1	3 000	27.34	0.44	12.84	0.49	0.24	0.87	110	1.50
24	0	1	0	1	2 300	27.28	0.47	12.83	0.52	0.24	0.91	70	3.00
25	0	0	0	0	2 000	21.78	0.33	10.06	0.58	0.25	1.03	80	3.00

主成分分析可将原始数据降维并同时反应各指标所包含的信息量权数,本文采用主成分分析法将 9 个竖井支护参数评价指标降维成几个综合指标,衡量各指标对支护参数评价的贡献率。主成分的特征值、贡献率及累计贡献率见表 6。

为保证所提取的主成分能够全面反应竖井支护参数信息,按照主成分累计贡献率大于 85% 的原则,提取 3 个主成分时,累计贡献率达到 90.3%,满足要求。各指标特征向量见表 7。

根据主成分特征值及特征向量,计算各方案综合

得分。为消除各指标间量纲和变异程度差异的影响,将综合得分进行规范化处理,结果见表8。

表6 相关成分的特征值及贡献率

指标	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
Y <sub>1</sub>	5.005 3	0.556	0.556
Y <sub>2</sub>	1.765 5	0.196	0.752
Y <sub>3</sub>	1.354 6	0.151	0.903
Y <sub>4</sub>	0.508 0	0.056	0.959
Y <sub>5</sub>	0.212 6	0.024	0.983
Y <sub>6</sub>	0.091 8	0.010	0.993
Y <sub>7</sub>	0.045 4	0.005	0.998
Y <sub>8</sub>	0.016 9	0.002	1.000
Y <sub>9</sub>	0	0	1.000

表7 主要指标的特征向量

指标	主成分1	主成分2	主成分3
Y <sub>1</sub>	0.363	0.257	0.32
Y <sub>2</sub>	0.421	0.068	-0.253
Y <sub>3</sub>	0.377	-0.123	-0.349
Y <sub>4</sub>	0.424	0.049	-0.245
Y <sub>5</sub>	-0.424	0.091	-0.219
Y <sub>6</sub>	-0.061	0.577	-0.371
Y <sub>7</sub>	-0.419	0.159	-0.104
Y <sub>8</sub>	0.002	0.614	-0.183
Y <sub>9</sub>	-0.104	-0.411	-0.650

表8 主成分得分及规范化综合得分

方案号	主成分1	主成分2	主成分3	综合得分	规范化综合得分
1	775.27	627.14	636.65	349.36	0.49
2	1065.81	814.73	898.77	474.51	0.94
3	629.92	517.79	509.83	284.68	0.26
4	557.58	491.37	439.11	256.24	0.15
5	518.78	409.66	424.27	232.20	0.07
6	591.39	467.19	486.47	264.87	0.18
7	887.76	685.88	735.31	395.59	0.66
8	960.30	737.27	799.37	427.45	0.77
9	482.34	383.76	391.98	216.18	0.01
10	700.45	557.19	579.79	314.49	0.36
11	851.61	648.12	707.21	378.12	0.59
12	996.67	757.46	834.18	442.73	0.82
13	884.10	679.88	740.33	393.93	0.65
14	666.16	525.06	547.31	298.15	0.30
15	956.75	749.68	798.86	428.25	0.77
16	702.47	556.90	577.51	314.90	0.36
17	666.17	537.15	543.32	299.73	0.31
18	775.29	621.19	638.80	348.60	0.49
19	666.21	555.55	537.85	302.18	0.32
20	847.94	684.88	699.17	382.10	0.61
21	772.97	584.03	651.12	343.08	0.47
22	482.38	365.54	397.77	213.79	0.00
23	1 105.60	840.68	928.39	491.35	1.00
24	851.21	635.60	710.73	376.34	0.59
25	738.71	564.18	614.99	328.38	0.41

### 3 基于响应面分析的竖井支护参数优选及现场验证

响应面分析方法是通过响应面等值线的分析,寻求最优工艺参数。针对需优化的参数开展 Box-Behnken Design 响应面优化试验设计,并经主成分分析,以规范化综合评分作为响应值,建立多元二次回归方程拟合因素与响应值之间的函数关系为:

$$Z = -0.711 + 0.03933A - 0.1552B + 0.091C + 0.02783D + 0.07B^2 - 0.01383AB \quad (11)$$

回归模型方差分析结果见表9。由表9可知,该模型具有极高显著性( $p < 0.01$ );  $R^2 = 0.9786$ ,  $R_{adj}^2 = 0.9721$ ,说明模型对试验结果拟合度较高,可用该回归方程进行预测。

表9 回归模型方差分析

方差来源	自由度	离均差平方和	均方	F值	P值
模型	6	1.813	0.302	152.15	0
线性	4	1.704	0.426	214.48	0
A	1	0.163	0.163	82.16	0
B	1	0.587	0.587	295.31	0
C	1	0.025	0.025	12.51	0.002
D	1	0.930	0.930	467.95	0
平方	1	0.033	0.033	16.44	0.001
B <sup>2</sup>	1	0.033	0.033	16.44	0.001
双因子交互作用	1	0.077	0.077	38.54	0
AB	1	0.077	0.077	38.54	0
误差	20	0.040	0.002		
失拟	18	0.040	0.002	*	*
纯误差	2	0.000	0.000		
合计	26	1.853			
R <sup>2</sup>		0.9786			
R <sub>adj</sub> <sup>2</sup>		0.9721			

分析回归方程可知,竖井支护优化参数为锚杆水平方向数量35根、锚杆垂直方向间距1m、锚杆长度2.5m、衬砌混凝土强度等级C35,该参数条件下综合拟合值达到1.298。上述优化支护结构参数在竖井施工过程中得到验证,卡莫亚矿区副井掘进完毕后井筒衬砌未见变形或开裂现象,整体稳定性较好。

### 4 结 语

1) 基于层次分析法(AHP)和主成分分析法(PCA)进行主客观赋权,根据理论和经验选取包含安全、经济、技术三方面的评价指标,构建了竖井支护参数综合评价模型,克服了评价指标单一、主观因素干扰等缺陷,评价方法更系统,结果更真实。

(下转第25页)

- 运移数值模拟[J]. 中国科学:技术科学, 2022,52(4):627-638.
- [2] 李婷,刘江,谭凯旋,等. 氧化剂对超临界 CO<sub>2</sub> 流体浸取矿石中铀的影响[J]. 化学工程, 2016,44(12):16-20.
- [3] 蔡贵龙. 超临界 CO<sub>2</sub> 对砂岩铀矿铀浸出率的影响研究[D]. 衡阳:南华大学核资源工程学院, 2013.
- [4] WANG Gang, HAN Dongyang, QIN Xiangjie, et al. A comprehensive method for studying pore structure and seepage characteristics of coal mass based on 3D CT reconstruction and NMR[J]. Fuel, 2020,281:118735.
- [5] Testamanti M N, Rezaee R. Considerations for the acquisition and inversion of NMR T<sub>2</sub> data in shales[J]. Journal of Petroleum Science Engineering, 2019,174:177-188.
- [6] Sijian Z, Yanbin Y, Dameng L, et al. Characterizations of full-scale pore size distribution, porosity and permeability of coals: A novel methodology by nuclear magnetic resonance and fractal analysis theory[J]. International Journal of Coal Geology, 2018,196:148-158.
- [7] 翟成,孙勇,范宜仁,等. 低场核磁共振技术在煤孔隙结构精准表征中的应用与展望[J]. 煤炭学报, 2022,47(2):828-848.
- [8] 周科平,薛轲,刘涛影. 微波作用下砂岩孔隙结构演化及强度劣化的试验研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(2):6-11.
- [9] LYU Chaohui, NING Zhengfu, WANG Qing, et al. Application of NMR T<sub>2</sub> to Pore Size Distribution and Movable Fluid Distribution in Tight Sandstones[J]. Energy & Fuels, 2018,32(2):1395-1405.
- [10] 蒋复量,陈冠,王小丽,等. 基于核磁共振的铀尾砂固化体孔隙特征与氮析出率的试验研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(3):4-9.
- [11] JIN Guowen, XIE Ranhong, LIU Mi, et al. A new method for permeability estimation using integral transforms based on NMR echo data in tight sandstone[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019,180:424-434.
- [12] Timur A. Pulsed Nuclear Magnetic Resonance Studies of Porosity, Movable Fluid, and Permeability of Sandstones[J]. Journal of Petroleum Technology, 1969,21(6):775-786.
- [13] 孙晓彤,周宏伟,薛东杰,等. 基于 NMR 的低渗煤体自渗吸实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021,50(4):804-812.
- 引用本文: 杨鑫,张通,杜志明,等. 砂岩型铀矿碱性地浸过程孔隙结构演化特征[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):21-25.

(上接第20页)

2) 以规范化综合评分为响应指标,构建多元二阶预测方程。预测结果表明,竖井支护优化参数为锚杆水平方向数量 35 根、锚杆垂直方向间距 1 m、锚杆长度 2.5 m、衬砌混凝土强度等级 C35,该参数条件下综合拟合值达到 1.298。实践表明,该回归预测模型选取的优化井筒支护参数可行,有效降低了竖井建设成本,提高了竖井安全性和稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 翁承显,黄林,史宁强,等. 基于敏感性分析的地铁站矩形深通风竖井支护参数优化[J]. 公路交通技术, 2020,36(5):121-127.
- [2] 姚夏壹. 高水压深竖井衬砌受力特征及支护技术研究[D]. 北京:北京交通大学土木建筑工程学院, 2021.
- [3] 濮奇浩,骆晓锋,徐磊,等. 复杂支护结构软弱地层深竖井施工过程仿真分析[J]. 人民黄河, 2022,44(3):144-148.
- [4] 仲淑娟,李燕娇. 基于组合赋权法的回采巷道快速掘进能力评价及应用[J]. 煤炭工程, 2021,53(1):60-64.
- [5] 程健,张钦礼,薛希龙,等. 基于 AHP 和 TOPSIS 法的采场结构参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2014,34(1):1-5.
- [6] 李明,吴波. 基于截尾概率分布的基坑突涌模糊可靠度分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019,15(1):294-302.
- [7] 麻凤海,杨天宇. 某深基坑支护结构变形影响参数研究[J]. 公路工程, 2021,46(4):66-72.
- [8] 吴雪莉,郑建明,任凤玉,等. Surda 铜矿无底柱分段崩落法结构参数优化[J]. 中国矿业, 2016,25(6):88-90.
- [9] 贾玉霞. 基于博弈论组合赋权和模糊评价的我国跨境电商物流模式研究[D]. 杭州:浙江工商大学管理工程与电子商务学院, 2017.
- [10] 张纪伟,胡建华,亓中华,等. 复杂环境下采场结构参数优化与自适应表征分析[J]. 中国矿山工程, 2018,47(5):51-55.
- [11] 刘合香. 模糊数学理论及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2012.
- [12] 胡建华,任启帆,黄仁东,等. 地下矿山采场结构参数的核主成分分析法优化[J]. 矿冶工程, 2018,38(2):25-29.
- [13] 熊文,石惠铎,刘海龙,等. 基于响应面法的桥梁抗洪裕度计算理论与应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021,51(5):803-812.
- 引用本文: 刘超,祁赞朴,宋章伦,等. 基于组合赋权法和响应面法的竖井支护参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):16-20.