

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.S2.074

大采高碎裂煤巷软弱围岩控制优化研究

赵 明¹, 黄 侃¹, 林 佳², 张 鹏¹, 赵 健¹, 陈 磊¹, 葛勇勇³

(1. 中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西 西安 710054;
3. 国家自然科学基金委员会, 北京 100085)

摘 要: 为解决谢桥煤矿 1232(3)工作面回风巷道围岩控制的技术难题与经济合理性问题, 运用正交实验方法, 以巷道两帮与顶底板收敛量为指标, 对不同因素不同水平的正交实验数据进行极差分析, 得出锚杆直径与间排距为影响回风巷道围岩控制效果的主要敏感因素。同时, 选定技术与经济指标, 通过分析各关键因素对围岩控制效果的影响情况得出 2 组局部优化方案, 并借助灰色关联分析方法对不同方案进行综合分析和决策, 得出最终优化方案。现场实际应用表明, 支护参数优化后巷道围岩变形得到有效控制, 技术经济效益显著。

关 键 词: 锚杆锚索; 围岩控制; 优化; 灰色关联分析

中图分类号: TD 353

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2016)增 2-0589-08

Optimization research on weak rock control in coal roadway of large mining height

ZHAO Ming¹, HUANG Kan¹, LIN Jia², ZHANG Peng¹, ZHAO Jian¹, CHEN Lei¹, GE Yong-yong³

(1. School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. China Coal Xi'an Design Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shanxi 710054, China; 3. National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China)

Abstract: To solve the problems about the technology and economic rationality of the surrounding rock control in the air-return gate of 1232(3) face in Xieqiao coal mine, it is concluded that bolt diameter and row spacing are the main sensitive factors that affect the surrounding rock control results of the air-return gate by using orthogonal experiment method to analyze the experiment data of different factors in different levels with the roadway's sides and roof-to-floor convergence as indexes. Meanwhile, two locally optimization schemes are obtained by analyzing the key factors that affect the surrounding rock control results after taking the techno-economic indicators into consideration. The final optimization scheme is reached by comprehensive analysis and decision-making of the two schemes according to the method of grey correlation analysis. The actual application shows that the deformation of surrounding rock of roadway is controlled effectively and the techno-economic benefit is remarkable after the optimization of the support parameters.

Keywords: anchor bolt / anchor cable; surrounding rock control; optimization; grey correlation analysis

1 引 言

锚杆-锚索联合支护使破碎、大变形等困难复杂巷道的安全稳定性得到有效提高, 在煤巷中得到了广泛的运用^[1-6]。处于开采扰动影响的煤层巷道, 面临顶压条件下围岩稳定的安全问题和围岩控制成本的经济合理性问题, 由于二者相互制约, 开展巷道围岩控制的优化研究, 对矿井安全、高效生产具

有重要意义^[7-12], 国内学者对此做出了大量研究, 李化敏等^[13]对朝川矿锚网索支护存在的问题进行了理论分析和现场调研, 从围岩性质、地质力学特征等方面对巷道破坏范围进行了计算, 并对锚网支护参数进行了优化。戴俊等^[14]基于围岩与锚杆共同作用原理, 通过计算和锚杆受力监测, 调整锚杆参数的方法, 实现了锚杆支护的参数优化。申艳梅等^[15]依据围岩完整性、巷道埋深、围岩强度、煤柱

收稿日期: 2016-03-14

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金 (No.20120023110023); 中央高校基本科研业务费专项资金 (No.2014QZ03)。

This work was supported by Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20120023110023) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2014QZ03).

第一作者简介: 赵明, 男, 1989 年生, 博士, 从事矿山压力与岩层控制方面的研究工作。E-mail: 252797905@qq.com

宽度、巷道断面、支护强度、采动影响等 7 个指标,采用模糊聚类分析的方法将巷道围岩支护效果分为 4 类,为锚杆支护参数的确定提供了依据。

由于巷道联合支护体系趋于多元化、复杂化,影响巷道围岩控制效果的因素众多,且部分不确定的因素构成了一个模糊的灰色系统,通过传统的理论计算和经验类比等方法难以对这些因素进行一一分析和研究,要得出安全、经济的围岩控制方案就越困难。本文依靠正交实验方法,系统地分析了影响谢桥煤矿 1232(3)工作面回风巷道围岩控制效果的主要敏感因素,并运用灰色系统理论中的灰色关联分析方法对局部优化方案进行综合分析和决策,得出最终围岩控制方案。

2 工程概况

谢桥煤矿 1232(3)工作面采用大采高一次采全厚综采法开采,如图 1 所示。工作面位于 13-1 煤东三采区三阶段,走向长 3 015 m,倾斜长 212 m,上区段 1222(3)工作面已回采完毕。工作面回风巷道与 1222(3)工作面之间所留设的区段煤柱宽度为 7.0 m,为满足回采期间通风、运输需要,断面形状设计为直角梯形,其断面尺寸(净宽×中高)为 5.0 m×3.0 m。开采煤层平均厚度为 4.83 m,平均倾角为 13°,平均埋深为 459 m。工作面煤层顶板为泥岩,局部为细砂岩,底板为粉砂岩,煤层及顶底板岩层力学参数见表 1。

由于工作面一次性采出高度较大,且煤层松软破碎,巷道围岩变形破碎严重,巷道安全稳定程度给工作面的正常回采带来了一定的安全隐患。巷道采用锚喷网联合支护方式进行支护,为使围岩控制效果更加安全、可靠,控制参数设计经济、合理,本文将对该支护体系中控制巷道围岩稳定的最关键因素即锚杆与锚索的支护参数进行合理优化。

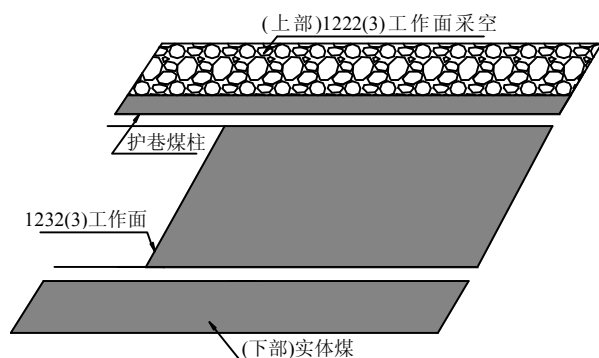


图 1 1232(3)工作面示意图
Fig.1 Sketch plot of 1232 (3) face

表 1 煤岩力学参数
Table 1 Parameters for different rocks tested

岩性	重度 /(kg/m ³)	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	体积模量 /MPa	厚度 /m
砂质泥岩	2 485	0.23	1.60	36	5 405	74.90
泥岩	2 610	0.34	1.50	29	4 821	18.11
煤	1 347	0.31	1.20	30	2 136	4.83
粉砂岩	2 602	0.22	3.30	38	7 106	12.50
细砂岩	2 590	0.20	3.96	40	6 982	17.50

3 围岩控制优化研究

3.1 正交数值实验研究

巷道围岩控制效果直接体现围岩的移动变形情况,将巷道两帮最大移近量 ΔX 与顶底板最大移近量 ΔY 作为正交实验所考察的指标,同时考虑可变的主要因素,忽略不可变因素与次要因素。在锚杆-锚索联合控制体系中控制巷道围岩变形与位移的主要因素是锚杆长度、直径、间排距以及锚索长度。从现场巷道顶部围岩位移来看,岩体位移主要发生在距离顶板 2 m 的范围之内,根据组合拱理论,对于锚杆长度的选择应当穿越拱区同时不大于 1.2 倍的拱区范围^[16-17],因此,锚杆长度主要在 1.6、1.8、2.0、2.2 m 中进行优化和选择,巷道两帮支护参数见表 2。

表 2 影响因素和参数
Table 2 Influence factors and parameters

水平	因素			
	锚杆长度 A/ m	锚杆直径 B/ mm	间排距 C/ (mm×mm)	锚索长度 D/ m
1	1.6	16	600×600	6.4
2	1.8	18	700×700	7.4
3	2.0	20	800×800	8.4
4	2.2	22	900×900	9.4

根据不同因素和各水平参数选定不同方案进行实验,实验中包含 4 因素与 4 水平,采用 $L_{16}(4^4)$ 正交表进行设计^[18-19],一共包含 16 组计算方案,见表 3。由于顶板破坏程度大于两帮,同一水平的顶板支护参数需在两帮支护参数的基础上进行提高,锚杆长度 $A+0.6$ m,直径 $B+2$ mm,间距 $C+200$ mm,排距则保持不变。

影响巷道围岩移动变形的主要因素包括围岩物理力学性质、巷道埋深、采厚、煤柱尺寸及采掘扰动等,且围岩最终的变形破坏主要来自采掘扰动等外在因素的影响^[20-21]。为确保在围岩自身力学行为响应下对影响围岩控制效果的敏感因素识别的准确性及最终优化决策的惟一性,采用 UDEC 数值模拟

方法在二维平面应变条件下对不同实验方案进行模拟计算, 从而排除采掘扰动等外在因素对研究结论的影响。基于离散单元法理论的 UDEC 数值模拟方法以最为朴素的思想分别描述介质内的连续性元素和非连续性元素, 可以将岩体的两个基本组成对象—岩块和结构面分别以连续力学定律和接触定律加以描述并广泛应用于介质的变形、渐进破坏及深埋

地下工程围岩破坏等问题^[22]。鉴于 UDEC 数值模拟方法具备连续介质力学范畴内的普遍性分析能力, 因此其可以较真实地反映锚网支护条件下松软破碎巷道围岩变形和破裂区的控制效果^[7, 23-24]。利用 UDEC 模拟软件模拟工作面回采时巷道围岩的移动变形, 根据计算结果进一步得出回风巷两帮移近量 ΔX 和顶底板移近量 ΔY , 计算结果见表 3。

表 3 实验方案与计算结果
Table 3 Experiment schemes and calculation results

方案	锚杆						锚索 长度/ m	左帮 / mm	右帮 / mm	ΔX / mm	顶板 / mm	底板 / mm	ΔY / mm
	长度/ m		直径/ mm		间排距/ (mm×mm)								
	两帮	顶板	两帮	顶板	两帮	顶板							
1	1.6	2.2	16	18	900×900	1100×900	8.4	26.61	80.55	107.16	133.8	119.4	253.2
2	1.6	2.2	18	20	800×800	1000×800	7.4	22.28	73.22	95.5	133.6	122.0	255.6
3	1.6	2.2	20	22	600×600	800×600	9.4	24.2	63.59	87.79	126.4	121.9	248.3
4	1.6	2.2	22	24	700×700	900×700	6.4	14.61	62.24	76.85	128.0	119.9	247.9
5	1.8	2.4	16	18	600×600	800×600	6.4	30.03	67.15	97.18	128.8	122.7	251.5
6	1.8	2.4	18	20	700×700	900×700	9.4	18.48	63.15	81.63	130.0	119.7	249.7
7	1.8	2.4	20	22	900×900	1100×900	7.4	18.11	65.58	83.69	128.8	121.2	250
8	1.8	2.4	22	24	800×800	1000×800	8.4	16.3	61.02	77.32	128.0	122.5	250.5
9	2.0	2.6	16	18	800×800	1000×800	9.4	23.27	70.87	94.14	132.7	123.0	255.7
10	2.0	2.6	18	20	900×900	1100×900	6.4	22.58	68.88	91.46	131.4	123.2	254.6
11	2.0	2.6	20	22	700×700	900×700	8.4	15.80	56.52	72.32	127.0	118.2	245.2
12	2.0	2.6	22	24	600×600	800×600	7.4	22.02	60.50	82.52	124.7	124.0	248.7
13	2.2	2.8	16	18	700×700	900×700	7.4	21.07	63.41	84.48	130.4	117.9	248.3
14	2.2	2.8	18	20	600×600	800×600	8.4	27.26	57.86	85.12	127.4	122.1	249.5
15	2.2	2.8	20	22	800×800	1000×800	6.4	17.92	58.26	76.18	128.8	125.4	254.2
16	2.2	2.8	22	24	900×900	1100×900	9.4	17.75	58.60	76.35	127.6	120.1	247.7

3.2 敏感因素分析

表 4 为两帮移近量 ΔX 和顶底板移近量 ΔY 在各因素下实验数据的极差。表中, A_{ij} 为第 i 行第 j 列实验数据之和; R_j 为第 j 列实验数据的极差。由表可知, 锚杆的长度、直径、间排距以及锚索长度等各影响因素的极差分别为 45.17、69.92、56.05、6.28, 其中锚杆直径的极差最大, 锚索长度的极差最小。当锚杆直径与锚杆间排距取不同水平时, 指标 ΔX 的变化最大, 而锚杆长度与锚索长度的变化对指标 ΔX 的影响均较小, 因此, 影响巷道两帮位移的第一影响因素为 B , 第二影响因素为 C , 且二者同为主要影响因素; 而因素 A 与因素 D , 即锚杆长度与锚索长度, 二者极差相对较小, 故将二者视为次要因素。同样, 对于指标 ΔY , 因素 C 与因素 B , 即锚杆间排距与锚杆直径均为主要影响因素; 因素 A 与因素 D , 即锚杆长度与锚索长度二者为次要因素。

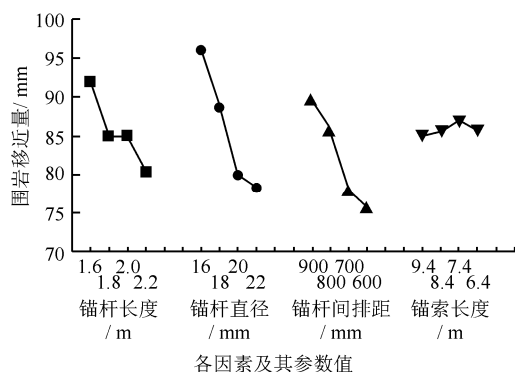
图 2 为各不同因素下巷道两帮最大移近量和顶

表 4 两帮和顶底板移近量极差分析

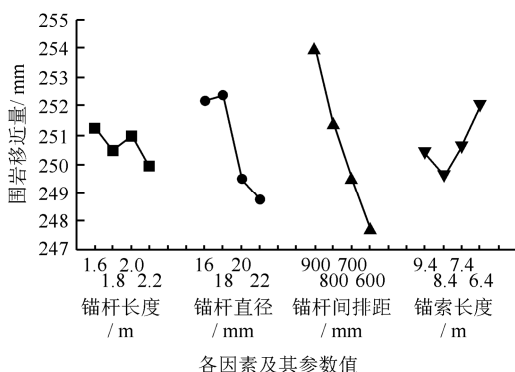
Table 4 Range analysis of roadway's sides convergence

位置	求和	因素			
		A	B	C	D
两帮	A_j	367.30	382.96	358.66	339.91
	A_{2j}	339.82	353.71	343.14	341.92
	A_{3j}	340.44	319.98	315.28	346.19
	A_{4j}	322.13	313.04	302.61	341.67
	R_j	45.17	69.92	56.05	6.28
	A_j	1 005.00	1 008.70	1 005.50	1 001.40
顶底板	A_{2j}	1 001.70	1 009.40	1 016.00	998.40
	A_{3j}	1 004.20	997.70	991.10	1 002.60
	A_{4j}	999.70	994.80	998.00	1 008.20
	R_j	5.30	14.60	24.90	9.80
	A_j				

底板最大移近量。锚杆长度、直径及间排距变化时, 巷道两帮位移受影响的敏感程度要大于巷道顶底板位移受影响的敏感程度; 锚索长度变化时, 巷道顶底板位移受到的影响则较大。锚杆直径与间排距同时对指标 ΔX 与指标 ΔY 有较大影响, 二者均为主要影响因素。



(a) 巷道两帮



(b) 巷道顶底板

图2 不同因素下巷道两帮和顶底板最大移近量

Fig.2 Maximum convergence of roadway's sides, roof and floor in different factors

3.3 优化方案研究

巷道围岩的设计控制参数: 两帮锚杆长度为 2.0 m, 直径为 22 mm; 顶板锚杆长度为 2.6 m、直径为 22 mm, 锚索长度为 7.4 m。两帮和顶板锚杆间排距分别为 600 mm×600 mm 和 800 mm×800 mm。依据原有围岩控制参数和正交实验结果, 共设计了 9 组优化方案, 见表 5。以巷道每米支护所用钢量作为经济指标, 应用数值模拟软件对每组方案进行计算, 围岩变形速率趋近于 0 时, 计算结果见表 6。

表5 优化方案
Table 5 Optimization schemes

序号	锚杆长度 /m		锚杆直径 /mm		锚杆间排距 /(mm×mm)		锚索长度 /m
	两帮	顶板	两帮	顶板	两帮	顶板	
1	2	2.6	18	20	600×600	800×600	7.4
2	2	2.6	18	20	700×700	900×700	7.4
3	2	2.6	18	20	800×800	1000×800	7.4
4	2	2.6	20	22	600×600	800×600	7.4
5	2	2.6	20	22	700×700	900×700	7.4
6	2	2.6	20	22	800×800	1000×800	7.4
7	2	2.6	22	24	700×700	900×700	7.4
8	2	2.6	22	24	800×800	1000×800	7.4
9	2	2.6	22	24	900×900	1100×900	7.4

从围岩控制技术角度考虑, 优化目标为巷道围岩变形量最小, 由表 7 可知, 巷道顶底板位移最小值对应方案 4, 巷道左帮位移量与巷道右帮位移量最小值均对应方案 7, 故可将方案 4、7 定义为局部优化方案。从经济角度对两组局部优化方案进行对比可知, 方案 7 比方案 4 优。为了确定最优控制方案, 需结合灰色系统理论对巷道围岩控制效果及经济合理性进行整体考虑和优化, 进而确定巷道最优控制方案。

表6 局部优化方案量化评价指标

Table 6 Quantitative evaluation indexes of local optimization schemes

方案	评价指标	顶板位移量 /mm	左帮位移量 /mm	右帮位移量 /mm	用钢量 /(kg/m)
4	顶底板位移量	244.2	25.6	55.3	235.44
7	左帮位移量	246.6	14.0	53.3	201.11
7	右帮位移量	246.6	14.0	53.3	201.11

表7 优化方案结果

Table 7 Results of optimization scheme

序号	顶底板位移量 /mm	左帮位移量 /mm	右帮位移量 /mm	用钢量 /(kg/m)
1	246.9	27.2	59.8	205.42
2	249.3	18.2	60.6	156.44
3	251.2	20.5	65.2	136.89
4	244.2	25.6	55.3	235.44
5	247.2	15.9	56.3	177.76
6	250.8	18.2	61.8	155.54
7	246.6	14.0	53.3	201.11
8	250.5	16.0	58.6	175.97
9	248.8	18.3	60.5	140.29

3.4 灰色关联分析

灰色系统理论是由邓聚龙教授于 1982 年提出的一种系统科学理论, 其中的灰色关联分析方法用来判断各因素之间发展趋势的相似或相异程度, 亦即通过对系统内有关因素统计数据几何关系的比较, 求出参考数列与各比较数列之间的灰色关联度, 从而衡量因素间的关联程度^[25]。

(1) 确定相对最优方案

通过对各方案的围岩控制效果以及经济合理性进行综合分析, 取各方案最优指标可得相对最优方案。对于评价指标中的位移量和用钢量, 均采用相应确定的数值加以分析 (见表 6)。

取局部优化方案不同因素的最优指标得相对最优方案向量 $s = (244.2 \ 14.0 \ 53.3 \ 201.11)$, 结合局部优化方案的决策矩阵:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 244.2 & 25.6 & 55.3 & 235.44 \\ 246.6 & 14.0 & 55.3 & 201.11 \\ 246.6 & 14.0 & 55.3 & 201.11 \end{bmatrix} \quad (1)$$

可得特征量矩阵:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 244.2 & 25.6 & 55.3 & 235.44 \\ 246.6 & 14.0 & 53.3 & 201.11 \\ 246.6 & 14.0 & 53.3 & 201.11 \\ 244.2 & 14.0 & 53.3 & 201.11 \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2) 特征量矩阵的无量纲化

为消除各评价指标量纲以及数量上的差异对最终决策的影响, 需对特征量矩阵进行无量纲化, 采用均值化处理方法, 取各指标平均值:

$$\overline{x_i(k)} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i(k) \quad (3)$$

经均值化处理得新数列:

$$x'_i(k) = x_i(k) / \overline{x_i} \quad (4)$$

将矩阵 $\mathbf{X}$ 代入式 (3)、(4), 计算可得支护参数无量纲化特征量矩阵:

$$\overline{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} 0.995 & 1.51 & 1.03 & 1.12 \\ 1.005 & 0.83 & 0.99 & 0.96 \\ 1.005 & 0.83 & 0.99 & 0.96 \\ 0.995 & 0.83 & 0.99 & 0.96 \end{bmatrix} \quad (5)$$

(3) 关联系数的确定

参考数列 x_0 与直接比较数列 x_i 在第 k 点的绝对差为

$$\Delta(k) = |x_0(k) - x_i(k)| \quad (6)$$

由矩阵 $\overline{\mathbf{X}}$ 得相对最优方案与局部优化方案的绝对差的矩阵形式为

$$\overline{\Delta(k)} = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.68 & 0.04 & 0.16 \\ 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其两级最小差与两级最大差分别为

$$\left. \begin{aligned} \min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| &= 0 \\ \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)| &= 0.68 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

参考数列与直接比较数列在第 k 点的关联系数

为

$$\zeta_{0i} = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (9)$$

式中: 称 ρ 为分辨系数, 通常取 $\rho = 0.5$ 。经计算得相对最优方案与局部优化方案的关联系数的矩阵形式为

$$\overline{\zeta} = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.33 & 0.89 & 0.68 \\ 0.97 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 0.97 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (10)$$

(4) 确定权重向量

权重向量可体现出指标特征值之间的差异, 采用变异系数法计算时, 评价矩阵中第 k 个指标的均方差、变异系数、权重向量分别为

$$D_k = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [\overline{x_i(k)} - x_i(k)]^2} \quad (11)$$

$$\delta_k = D_k / x_i(k) \quad (12)$$

$$w_k = \delta_k / \sum_{k=1}^n \delta_k \quad (13)$$

其矩阵形式分别为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{D} &= (0.0041 \quad 0.2776 \quad 0.0163 \quad 0.0653)^T \\ \boldsymbol{\delta} &= (0.0041 \quad 0.2627 \quad 0.0162 \quad 0.0644)^T \\ \mathbf{W} &= (0.012 \quad 0.756 \quad 0.0466 \quad 0.185)^T \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

(5) 关联度的确定

结合各点的关联系数可知, 曲线 x_i 与参考曲线 x_0 的关联度为

$$u_i = \sum_{k=1}^n w_k \zeta_{0i}(k) \quad (15)$$

由式 (15) 得局部优化方案相对于相对最优方案的关联系数分别为 $u_1 = 0.428 \ 8$, $u_2 = 0.992 \ 4$ 。关联系数 $u_2 > u_1$, 故方案 7 为最终优化方案, 即巷道两帮锚杆长 2.0 m, 锚杆直径为 22 mm, 间排距为 700 mm×700 mm; 巷道顶板锚杆长 2.6 m, 锚杆直径为 24 mm, 间排距为 900 mm×700 mm, 锚索长 7.4 m, 巷道支护布置如图 3 所示。

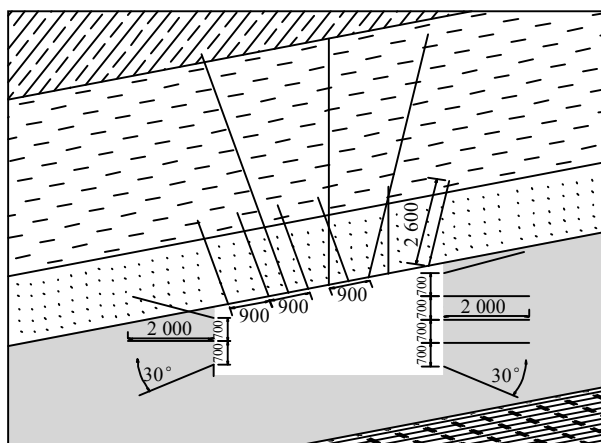


图3 巷道支护布置图(单位:mm)

Fig.3 Support plan of the roadway (unit:mm)

4 工程应用

围岩控制参数优化后对巷道围岩表面位移进行了监测,图4为距工作面不同距离处巷道顶底板、顶板、两帮及右帮表面位移量监测曲线。由于煤柱宽度较窄,煤质松软破碎,在采掘扰动影响下,巷道围岩变形量较大。监测结果为围岩破碎后围岩表面的最大位移值,较前述数值计算结果偏大。如图4所示,随着距工作面距离减小,巷道表面位移量均有所增大,在距工作面50 m以后位移量趋于稳定。两帮最大移近量为285 mm,其中煤柱表面位移量最大值达到176 mm。顶底板最大移近量达505 mm,顶板最大下沉量为280 mm。现场应用中,巷道围岩总体稳定,其变形满足安全生产要求。原设计巷道用钢量为229.58 kg/m,控制参数经优化后,巷道用钢量降低为201.11 kg/m,现场一次性节约支护钢材共计85.8 t。

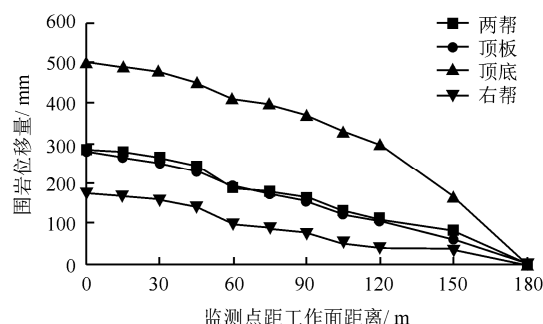


图4 巷道围岩表面位移曲线

Fig.4 Displacement curves of surrounding rock

5 结论

(1) 基于谢桥煤矿1232(3)工作面所处围岩物理力学条件,揭示了原有围岩控制体系下的锚杆—

锚索联合支护参数中各要素对围岩自身力学行为的影响,通过正交实验和极差分析,确定出影响1232(3)工作面回风巷道锚杆—锚索联合支护效果的主要影响因素,为围岩控制参数的优化提供了依据。

(2) 考虑到巷道支护效果及支护成本的经济合理性对围岩控制优化的双重影响,选定技术经济指标并运用灰色关联分析法对局部优化方案进行综合分析和决策,从而确定出巷道最优支护方案。

(3) 围岩控制参数的优化设计合理,巷道围岩变形得到了有效控制,巷道围岩稳定程度满足工作面的安全生产要求。围岩控制参数得到优化后节约支护钢材,且工作面继续正常生产,取得了显著的技术经济效益。

参考文献

- [1] 曾祥勇, 邓安福. 锚索与锚杆联合锚固支护岩坡的有限元分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 790—794.
ZENG Xiang-yong, DENG An-fu. Finite element analysis of rock cutting slope reinforced by combined action of prestressed anchor cable and anchor bolt[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(4): 790—794.
- [2] 何满潮, 苏永华, 孙晓明, 等. 锚杆支护煤巷稳定性可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1810—1814.
HE Man-chao, SU Yong-hua, SUN Xiao-ming, et al. Reliability analysis of stability of coal roadway supported by rock-bolt[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(12): 1810—1814.
- [3] 王金华. 全煤巷道锚杆锚索联合支护机理与效果分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 1—7.
WANG Jin-hua. Analysis on mechanism and effect of rock bolts and cables in gateroad with coal seam as roof[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(1): 1—7.
- [4] 陈士海, 乔卫国, 孔德森. 大兴煤矿软岩巷道锚索带网支护技术应用研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊2): 902—904.
CHEN Shi-hai, QIAO Wei-guo, KONG De-sen. Research on bolt, anchor cable, steel strap and mesh combined support technique applying to Daxing Coal Mine for soft-rock tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(Supp.2): 902—904.
- [5] 王平, 姜福兴, 王存文, 等. 大变形锚杆索协调防冲支

- 护的理论研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(2): 191—196.
- WANG Ping, JIANG Fu-xing, WANG Cun-wen, et al. The study on coordination for avoiding impact using bolt and anchor cable with large deformation[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2012, 29(2): 191—196.
- [6] 康红普, 王金华, 林健. 煤矿巷道锚杆支护应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 649—664.
- KANG Hong-pu, WANG Jin-hua, LIN Jian. Case studies of rock bolting in coal mine roadways[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(4): 649—664.
- [7] 南培珠, 房姗姗, 王金安. 松软破碎煤巷锚网支护关键参数识别与优化[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1037—1042.
- NAN Pei-zhu, FANG Shan-shan, WANG Jin-an. Discernment and optimization on the key parameters of bolt-mesh support in the crushed soft roadway[J]. **Journal of China Coal Society**, 2009, 34(8): 1037—1042.
- [8] 杨志强, 高谦, 王正辉. 预应力锚索支护参数优化研究及在金川二矿区的应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1361—1366.
- YANG Zhi-qiang, GAO Qian, WANG Zheng-hui. Research on prestressed cable parameters optimization designs and its application to Jinchuan Mine No.2[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 1361—1366.
- [9] 康红普, 姜铁明, 高富强. 预应力锚杆支护参数的设计[J]. 煤炭学报, 2008, 33(7): 721—726.
- KANG Hong-pu, JIANG Tie-ming, GAO Fu-qiang. Design for pretensioned rock bolting parameters[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, 33(7): 721—726.
- [10] 张国祥. 软厚煤层综放工作面巷道支护形式与参数优化[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(7): 35—41.
- ZHANG Guo-xiang. Gateway support modes and parameter optimization of fully mechanized top coal caving mining face in soft and thick seam[J]. **Coal Science and Technology**, 2009, 37(7): 35—41.
- [11] 周跃峰, 王金安, 胡建军. 基于灰色模糊理论的巷道锚网支护设计与优化[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(12): 1177—1181.
- ZHOU Yue-feng, WANG Jin-an, HU Jian-jun. Design and optimization of bolt and wire mesh support for a tunnel based on the grey-fuzzy theory[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2007, 29(12): 1177—1181.
- [12] 高谦, 刘福军, 赵静. 一次动压煤矿巷道预应力锚索支护设计与参数优化[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 859—864.
- GAO Qian, LIU Fu-jun, ZHAO Jing. Prestressed anchor supporting design and parameters optimization for a coal tunnel affected by first mining[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(6): 859—864.
- [13] 李化敏, 蔡建德, 韩和平, 等. 朝川矿煤巷锚网索支护参数优化研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 95—98.
- LI Hua-min, CAI Jian-de, HAN He-ping, et al. Optimization of bolt-mesh-anchor support parameter in coal tunnel of Chaochuan Colliery[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2006, 23(1): 95—98.
- [14] 戴俊, 郭相参. 煤矿巷道锚杆支护的参数优化[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 1): 140—143.
- DAI Jun, GUO Xiang-can. Parameter optimization of bolting for coalmine roadways[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(Supp.1): 140—143.
- [15] 申艳梅, 韦四江. 回采巷道锚杆支护效果模糊综合评价[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(4): 576—580.
- SHEN Yan-mei, WEI Si-jiang. Fuzzy comprehensive evaluation of bolt support effects in deep-mining gateway[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2011, 28(4): 576—580.
- [16] 潘睿. 锚杆组合拱理论在煤巷中的应用[J]. 矿山压力与顶板管理, 2002, 19(2): 57—58, 61.
- PAN Rui. Application of composing bow theory about bolting in ladder-shaped cross sections of roadway[J]. **Ground Pressure and Strata Control**, 2002, 19(2): 57—58, 61.
- [17] 祝江鸿, 纪洪广, 卢鹏程, 等. 组合拱梁理论在回采巷道顶板锚杆支护中的应用[J]. 中国煤炭, 2009, 35(4): 69—72.
- ZHU Jiang-hong, JI Hong-guang, LU Peng-cheng, et al. Application of compound arch--girder theory in bolting support in gateway roof[J]. **China Coal**, 2009, 35(4): 69—72.
- [18] 刘文卿. 实验设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- LIU Wen-qing. Experimental design[M]. Beijing:

Tsinghua University Press, 2005.

- [19] 常聚才, 谢广祥. 深部巷道锚网索支护参数关键因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(3): 1—7.
- CHANG Ju-cai, XIE Guang-xiang. Analysis on key support parameters factors of bolting and anchoring with wire mesh in deep mine roadway[J]. **Coal Science and Technology**, 2014, 42(3): 1—7.
- [20] 周辉, 胡善超, 卢景景, 等. 煤矿深井巷道掘进全过程围岩变形破坏原位测试[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3523—3530.
- ZHOU Hui, HU Shan-chao, LU Jing-jing, et al. In-situ measurement of deformation and failure of surrounding rockmass during whole excavation process of deep coal mine roadway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(12): 3523—3530.
- [21] 惠功领, 牛双建, 靖洪文, 等. 动压沿空巷道围岩变形演化规律的物理模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 3(1): 77—81, 86.
- HUI Gong-ling, NIU Shuang-jian, JING Hong-wen, et al. Physical simulation on deformation rules of god-side roadway subjected to dynamic pressure[J]. **Journal of**

Mining & Safety Engineering, 2010, 3(1): 77—81, 86.

- [22] Itasca Consulting Group Inc. Manual of UDEC[M]. USA: Itasca Consulting Group Inc., 1997.
- [23] 陈有宝, 王金安, 周跃峰, 等. 采空区下薄顶煤大断面巷道锚网支护技术[J]. 中国矿业, 2007, 16(1): 58—61.
- CHEN You-bao, WANG Jin-an, ZHOU Yue-feng, et al. Bolt-mesh support technique for large sectional tunnel under mined gob with thin top-coal[J]. **China Mining Magazine**, 2007, 16(1): 58—61.
- [24] 王树仁, 王金安, 戴涌. 大倾角厚煤层综放开采顶煤移动规律与破坏机理的离散元分析[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(1): 5—8.
- WANG Shu-ren, WANG Jin-an, DAI Yong. Distinct element analysis on coal movement law and failure mechanism during mechanized top-coal caving in steep thick seam[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2005, 27(1): 5—8.
- [25] 袁嘉祖. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- YUAN Jia-zu. Gray theory and methods[M]. Beijing: Science Press, 1991.

上接第 577 页

- [4] KNEIFATI M C. Analysis of plates on a Kerr foundation model[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 1985, 111(11): 1325—1342.
- [5] AVRAMIDIS I E, MORFIDIS K. Bending of beams on three-parameter elastic foundation[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2006, 43(2): 357—375.
- [6] 张冬梅, 宗翔, 黄宏伟. 盾构隧道掘进引起上方已建隧道的纵向变形研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2659—2666.
- ZHANG Dong-mei, ZONG Xiang, HUANG Hong-wei. Longitudinal deformation of existing tunnel due to underlying shield tunneling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(9): 2659—2666.
- [7] 黄栩, 黄宏伟, 张冬梅. 开挖卸荷引起下卧已建盾构隧道的纵向变形研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1241—1249.
- HUANG Xu, HUANG Hong-wei, ZHANG Dong-mei. Longitudinal deflection of existing shield tunnels due to deep excavation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(7): 1241—1249.
- [8] 刘国彬, 侯学渊. 软土基坑隆起变形的残余应力分析法[J]. 地下工程与隧道, 1996, 44(2): 2—7.
- LIU Guo-bing, HOU Xue-yuan. Residual stress analysis of uplift deformation due to soft soil excavation[J]. **Underground Engineering and Tunnel**, 1996, 44(2): 2—7.
- [9] 徐凌. 软土盾构隧道纵向沉降研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- XU Ling. Research of the longitudinal settlement of soft soil shield tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2005.
- [10] 廖少明. 圆形隧道纵向剪切传递效应研究[D]. 上海: 同济大学, 2002.
- LIAO Sao-ming. Research on longitudinal shear transfer effect of circular tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2002.