

厚煤顶煤巷围岩稳定性类别评判及支护设计

姚晓晗 赵玉栋

(中煤科工集团北京华宇工程有限公司,北京 100120)

摘要: 在总结分析厚煤顶煤巷围岩变形破坏的主导因素基础上,进行煤岩样采集测试和底板比压测试,得出巷道煤岩几何力学参数值。选取围岩稳定性分类指标,确定合理取值,运用模糊综合评判法评判围岩稳定性类别。根据评判结果,确定支护参数选择方向,进而设计出合理的支护方案。现场工业试验结果表明:巷道围岩控制效果较好。

关键词: 厚煤顶;煤巷;模糊综合评判;工业试验

中图分类号: TD82

文献标识码: A

The surround rock stability category evaluation of thick coal roof roadway and support design

YAO Xiao-han, ZHAO Yu-dong

(Beijing Huayu Engineering Company, SCIEG, Beijing 100120, China)

Abstract: Based on summarizing and analysis of the main deformation destructive factors of surround rocks of roadways in the condition of thick coal roof, the tests of coal-rock sample collection and specific pressure in floor are conducted. The geometric and mechanical parameter of roadway's coal-rock was obtained. Selecting the classification index of surround rock's stability, the reasonable value was determined. The fuzzy comprehensive evaluation is used to evaluate the stability category of surround rock. According to the result of evaluation, the selection orientation of support parameters was determined. And then the reasonable support scheme was designed. The results of industrial test field show that the controlling effect of roadway's surround rock is excellent.

Key words: thick coal roof; coal roadway; fuzzy comprehensive evaluation; industrial test

我国的巷道支护技术有着悠久的历史,然而,随着勘探技术的进步,更多的煤炭资源被发掘,进而采煤工艺随之变化,随着放顶煤开采工艺的推广应用,越来越多的矿井需要开掘厚煤顶煤巷,由于顶板煤层厚度较大,采用锚杆索支护时,锚固点难以伸到稳定岩层,支护可靠性降低,给安全生产带来了影响,之前更多的研究是基于一般的岩石顶板,没有对煤层顶板尤其是厚煤顶板进行专门的研究^[1-2]。因此,探究此类巷道的围岩参数指标及类别,确定合理的支护参数,是解决该巷道围岩控制难题的有效技术探索,本文在总结分析厚煤顶煤巷围岩变形破坏的主导因素基础上,进行煤岩样采集测试和底板比压测试,对支护参数进行设计,确保安全掘进与支护,本文可为同类型巷道支护提供参考。

1 工程概况

安家岭井工二矿 B906 辅运顺槽所在煤层为石炭系上统太原组 9 号煤层,煤层厚 8.9~13.65 m,平均厚度 11.69 m,煤层倾角 1.8°~3.8°,平均 2.8°。煤层产状平缓,节理裂隙较发育,性脆,见黄铁矿结核,局部地段顶部有高灰分煤,平均厚 2.09 m。煤层结构复杂,含夹矸 2~7 层,直接顶板以灰白色中粗砂岩为主。直接底板以灰色~灰黑色泥质岩类为主。B906 辅运顺槽设计采用矩形断面,净宽 5 m,净高 3.3 m,该矿临近相似巷道异常矿压显现明显,出现过严重底臃、片帮、巷帮玻璃钢锚杆拉断失效等现象。为保证千万吨级矿井安全高效回采,有必要开展此类巷道合理支护参数的研究。

2 围岩破坏因素分析及参数指标测试

2.1 厚煤顶煤巷围岩破坏的主导因素

(1) 厚层煤顶及软弱顶板岩层,层理和构造裂隙发育,顶板自身稳定性较差,易产生离层和剪切破坏,不利于形成稳定的支护结构。

(2) 巷道两帮为煤体,且节理裂隙发育,巷道的垂直载荷向两帮传递和转移,煤帮所承受的压力增长,加大煤帮变形破坏和片帮。

(3) 地质条件的影响。断层、褶曲等构造带容易出现应力集中,围岩破碎,巷道控制难度大。顶板局部淋水现象严重,会弱化锚固剂锚固强度。

(4) 采动的影响。综放开采回采巷道围岩的应力分布特殊,改变了围岩破碎区、塑性区范围,导致了巷道失稳变形和破坏。

(5) 巷道断面的影响。巷道断面的增大使巷道围岩应力和变形成平方和立方急剧增长,巷道围岩破碎范围加大,从而使锚索、锚杆的锚固力得不到保证。

2.2 煤岩参数指标工程测试

(1) 煤岩样采集测试

采用 ZYG-150 全液压钻机在 B906 辅运巷顶板钻取煤岩样,进行煤岩芯编录,绘制钻孔柱状图,得出 B906 综放区段 2.8 m 的直接顶及 8.7 m 的老顶均为细砂岩。实验室进行压缩、劈裂、剪切试验,测定顶板煤岩力学参数,见表 1。

表 1 煤岩力学性质指标

Tab. 1 Index of rock mechanical properties of coal

试验名称	参数 / 岩性	泥岩	细砂岩	煤
劈裂	抗拉强度 σ_t / MPa	7.25	12.33	1.93
单轴压缩	单轴抗压强度 σ_c / MPa	66.42	67.70	33.85
	弹性模量 E / GPa	22.47	34.83	5.04
	泊松比 μ	0.187	0.209	0.303
剪切试验	剪切模量 G / GPa	9.47	14.40	1.93
	粘聚力 C / MPa	19.51	16.69	5.45
	内摩擦角 φ / °	31.36	40.41	40.54

(2) 底板比压测试

底板比压测定采用 DZD-IIA 型便携式底板比压仪,压模, DZ35-20/100 单体液压支柱,在 B906 辅运顺槽设 14 个测站进行观测,记录测站位置、压模直径、压力表数据、压入量。绘制底板比压与压入量的关系曲线,见图 1。

根据压力特性曲线, B906 辅运顺槽底板变形

以塑—脆性和塑性为主,分别占 57% 和 38%。计算分析确定底板允许比压为 19.6 MPa,底板允许刚度系数为 2.7 MPa/mm。根据我国煤炭行业标准《缓倾斜煤层采煤工作面底板分类》技术规范 (MT553-1996),确定 B906 综放面底板属于 IV 类中硬底板。

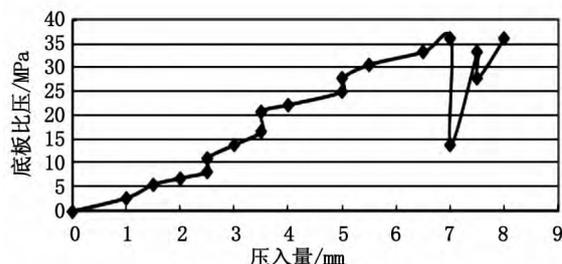


图 1 塑—脆性破坏曲线

Fig. 1 Plastic and brittle failure curve

3 厚煤顶煤巷围岩稳定性类别预测评判

3.1 煤巷围岩分类指标选取

根据我国《缓倾斜、倾斜煤层回采巷道围岩稳定性分类方案》。选择巷道顶板强度、煤层强度、底板强度、巷道埋深、岩体完整性指数、本区段采动影响指标、邻近区段采动影响指标 7 个影响因素作为分类指标,将缓倾斜、倾斜煤层回采巷道分为非常稳定、稳定、中等稳定、不稳定、极不稳定 5 个类别^[3-4]。

1) 三个围岩强度指标。

① $\sigma_{煤}$ 是巷道两帮煤层的平均强度,根据上述测试可知,煤层单向抗压强度 $\sigma_{煤}$ 为 33.85 MPa。

② 顶板强度 $\sigma_{顶}$ 取顶板 2 倍巷道宽度范围内 9.0 m 的煤层和 1.0 m 的细砂岩强度的加权平均值,顶板单向抗压强度 $\sigma_{顶}$ 为

$$\sigma_{顶} = \frac{9 \times 33.85 + 1 \times 67.70}{10} = 37.24 \text{ MPa}$$

③ 根据底板比压实测结果,巷道底板岩石单向抗压强度 $\sigma_{底}$ 为 19.6 MPa。

2) 岩体完整性指数。以直接顶初次垮落步距代替。B906 综放面直接顶初次垮落步距 14.5 m。

3) 埋藏深度 H 。根据实际测量数值选取。B906 辅运巷埋深 180 ~ 220 m,取埋深平均值 200 m。

4) 本区段采动影响指标 N 。采动影响系数 N 等于直接顶厚度除以煤层采高。B906 辅运巷上覆岩层为 9 m 厚的煤层,与 2.41 m 厚的细砂岩。

$$N = \frac{9 + 2.41}{3.3} = 3.46$$

5) 相邻区段采动影响指标 X 。用护巷煤柱的实际宽度表示。B906 辅运巷相邻区段护巷煤柱宽度为 20 m, 故 X 取 20。

3.2 模糊综合评判矩阵的构建

巷道围岩稳定性的类别是一个模糊概念, 在预测巷道围岩稳定性类别时设评语集合为 $V = \{ \text{I类, II类, III类, IV类, V类} \}$, 其模糊子集为 B , 因素集合为 $U = \{ \text{顶板强度, 煤层强度, 底板强度, 采动影响系数, 巷道埋深, 残余采动影响系数, 岩体完整性指数} \}$ 模糊子集为 A 。则因素论域和评语论域之间的模糊关系可用评价矩阵 R 来表示, 其中 $r_{ij} = U_R(u_i, \mu_j)$ 表示从 i 因素着眼, 该因素能评为 v_j 类的隶属程度。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{71} & r_{72} & \cdots & r_{75} \end{bmatrix}$$

模糊子集 A 和 B 可简化表示成模糊向量 $A = [a_1, a_2, \dots, a_7]$; $B = [b_1, b_2, \dots, b_7]$, 并且 $B = A \cdot R^{[5]}$ 按评语集 B 内各元素大小顺序, 预测判定巷道围岩稳定性类别。

3.3 模糊综合评判矩阵的选择和计算

模糊综合评判矩阵的选择的关键在于确定各因素相对于各类的隶属度, 本文采用距离法确定隶属程度。首先确定各因素的聚类中心, 然后通过对各类中心的距离比较, 得到单因素评判矩阵。如图 2。

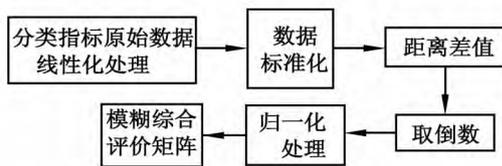


图2 模糊综合评价矩阵确定流程图

Fig.2 Fuzzy comprehensive evaluation matrix to determine the flow chart

(1) 分类指标原始数据的线性化在进行分类或预测巷道类别时, 首先对原始数据进行线性化处理。待判定的巷道(B906 辅运巷) 各指标参数线性化矩阵:

$$[0.163\ 8 \quad 0.171\ 9 \quad 0.225\ 8 \quad 3.460\ 0$$

$$200.000\ 0 \quad 0.382\ 0 \quad 14.500\ 0]$$

聚类中心是某一类巷道围岩所有样本的核心, 是该类的一个模式样本, 综合反应了该类指标的特性。标准样本指标参数线性化矩阵(煤巷分类标准):

$$\begin{bmatrix} 0.102\ 6 & 0.201\ 0 & 0.129\ 1 & 0.030\ 0 & 260.000\ 0 & 0.000\ 0 & 24.300\ 0 \\ 0.141\ 4 & 0.235\ 7 & 0.169\ 0 & 2.350\ 0 & 300.000\ 0 & 0.105\ 0 & 14.900\ 0 \\ 0.182\ 6 & 0.288\ 7 & 0.288\ 7 & 3.100\ 0 & 380.000\ 0 & 0.365\ 0 & 10.300\ 0 \\ 0.149\ 1 & 0.251\ 0 & 0.182\ 6 & 2.650\ 0 & 340.000\ 0 & 0.576\ 0 & 11.900\ 0 \\ 0.201\ 0 & 0.301\ 5 & 0.301\ 5 & 3.190\ 0 & 410.000\ 0 & 0.765\ 0 & 9.700\ 0 \end{bmatrix}$$

(2) 数据标准化^[6]

进行无量纲化处理, 将数据压缩在 $[0, 1]$ 之间。待判定的巷道(B906 辅运巷) 各指标参数标准化矩阵

$$[0.622\ 0 \quad 0.000\ 0 \quad 0.560\ 9 \quad 1.000\ 0 \\ 0.000\ 0 \quad 0.499\ 3 \quad 0.328\ 8]$$

标准样本指标参数标准差标准化矩阵

$$\begin{bmatrix} 0.000\ 0 & 0.224\ 5 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.285\ 7 & 0.000\ 0 & 1.000\ 0 \\ 0.394\ 3 & 0.492\ 3 & 0.231\ 4 & 0.676\ 4 & 0.476\ 2 & 0.137\ 3 & 0.356\ 2 \\ 0.813\ 0 & 0.901\ 2 & 0.925\ 8 & 0.895\ 0 & 0.857\ 1 & 0.477\ 1 & 0.041\ 1 \\ 0.472\ 6 & 0.610\ 3 & 0.310\ 3 & 0.763\ 8 & 0.666\ 7 & 0.752\ 9 & 0.150\ 7 \\ 1.000\ 0 & 1.000\ 0 & 1.000\ 0 & 0.921\ 3 & 1.000\ 0 & 1.000\ 0 & 0.000\ 0 \end{bmatrix}$$

(3) 绝对距离差值取倒数处理

计算待判定巷道(B906 辅运巷) 各指标参数值与各类中心的距离的倒数。

$$\begin{bmatrix} 1.607\ 8 & 4.453\ 6 & 1.782\ 8 & 1.000\ 0 & 3.500\ 0 & 2.002\ 6 & 1.489\ 8 \\ 43.929 & 2.081\ 3 & 3.035 & 2.080\ 1 & 2.100\ 0 & 2.761\ 7 & 36.500\ 0 \\ 5.234\ 0 & 1.109\ 6 & 2.740 & 9.527\ 8 & 1.166\ 7 & 45.000\ 0 & 3.476\ 2 \\ 6.693\ 9 & 1.638\ 4 & 3.990\ 7 & 4.234\ 6 & 1.500\ 0 & 3.943\ 3 & 5.615\ 4 \\ 2.645\ 2 & 1.000\ 0 & 2.277\ 4 & 12.703\ 7 & 1.000\ 0 & 1.997\ 4 & 3.041\ 7 \\ 20.573\ 8 & 10.233\ 0 & 13.827\ 1 & 30.556\ 1 & 9.266\ 7 & 55.705\ 0 & 50.123\ 0 \end{bmatrix}$$

(4) 归一化处理

将各指标参数值转化为表示相对重要程度的在 $0 \sim 1$ 之间一个实数, 即各指标参数值之和为 1。

$$\begin{bmatrix} 0.078 & 0.435 & 0.129\ 6 & 0.033 & 0.378 & 0.036 & 0.030 \\ 0.214 & 0.199 & 0.220 & 0.101 & 0.227 & 0.050 & 0.728 \\ 0.254 & 0.108 & 0.198 & 0.312 & 0.126 & 0.808 & 0.069 \\ 0.325 & 0.160 & 0.289 & 0.139 & 0.162 & 0.071 & 0.112 \\ 0.129 & 0.098 & 0.165 & 0.416 & 0.108 & 0.036 & 0.061 \end{bmatrix}$$

(6) 转置得出综合评判矩阵 R

$$R = \begin{bmatrix} 0.078 & 0.214 & 0.254 & 0.325 & 0.129 \\ 0.435 & 0.199 & 0.108 & 0.160 & 0.098 \\ 0.129 & 0.220 & 0.198 & 0.289 & 0.165 \\ 0.033 & 1.101 & 0.312 & 0.139 & 0.416 \\ 0.378 & 0.227 & 0.126 & 0.162 & 0.108 \\ 0.036 & 0.050 & 0.808 & 0.071 & 0.036 \\ 0.030 & 0.728 & 0.069 & 0.112 & 0.061 \end{bmatrix}$$

3.4 B906 辅运巷围岩稳定性判定结果

(1) 各指标权集确定

因素论域 U 上的各单因素 u_i 的权值,表示参与分类的指标的相对重要程度的一个实数 $k(i)$ 在 $0 \sim 1$ 之间, $\sum k(i) = 1$ 。因素论域 U 上的因素模糊子集即各指标权集(全国范围)为:

$$A = [0.11 \quad 0.03 \quad 0.21 \quad 0.11 \quad 0.122 \quad 0.3 \quad 0.118]$$

(2) 评语集的计算

$$B = A \cdot R = [0.113 \quad 0.215 \quad 0.373 \quad 0.171 \quad 0.128]$$

(3) B906 辅运巷围岩类别判定

由计算结果可知, B906 辅运巷为Ⅲ类围岩的隶属度最大。

3.5 支护参数选择方向

B906 辅运巷围岩属于Ⅲ类围岩,巷道断面尺寸为 $5.0 \text{ m} \times 3.3 \text{ m}$,顶板为 9.0 m 厚的煤层顶板,根据《煤巷锚杆支护技术规范》,支护方式采用锚杆+锚索(或钢筋梁)+网,或增加锚索桁架+网,或增加锚索^[7];主要支护参数为端锚:杆体直径: $16 \sim 18 \text{ mm}$,杆体长度: $1.6 \sim 2.2 \text{ m}$;间排距: $0.6 \sim 1.0 \text{ m}$;设计锚固力: $64 \sim 80 \text{ kN}$;全长锚固:杆体直径: $18 \sim 22 \text{ mm}$;锚杆长度: $1.8 \sim 2.4 \text{ m}$;间排距: $0.8 \sim 1.2 \text{ m}$ 。

4 厚煤顶煤巷支护设计

综合以上分析,确定 B906 辅运顺槽的支护形式及参数如图 3 所示。具体支护参数如下:

4.1 顶板支护

(1) 锚杆支护

顶锚杆形式和规格:采用 $\Phi 20 \text{ mm}$ 无纵筋螺纹钢锚杆,长度 2.4 m ,初锚力 $\geq 70 \text{ kN}$,安装扭矩 $\geq 140 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

锚固方式:树脂锚固,每孔使用 1 根 K2335,一根 Z2360 树脂锚固剂, K2335 在上, Z2360 在下。

锚杆布置:间排距为 $1100 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$,顶板打 5 排锚杆,最外一排到巷帮的距离为 300 mm 。靠近巷帮的顶锚杆安设角度与垂直方向成 15° 夹角,其余 3 根垂直顶板。

托盘规格:顶锚杆托盘 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。

顶板网片规格: $\Phi 4 \times 80 \text{ mm}$ 焊接方格网;长 \times 宽 = $3 \text{ m} \times 1.3 \text{ m}$;网片相互压茬 100 mm ,每 300 mm 用 14# 双股铁丝扎牢。

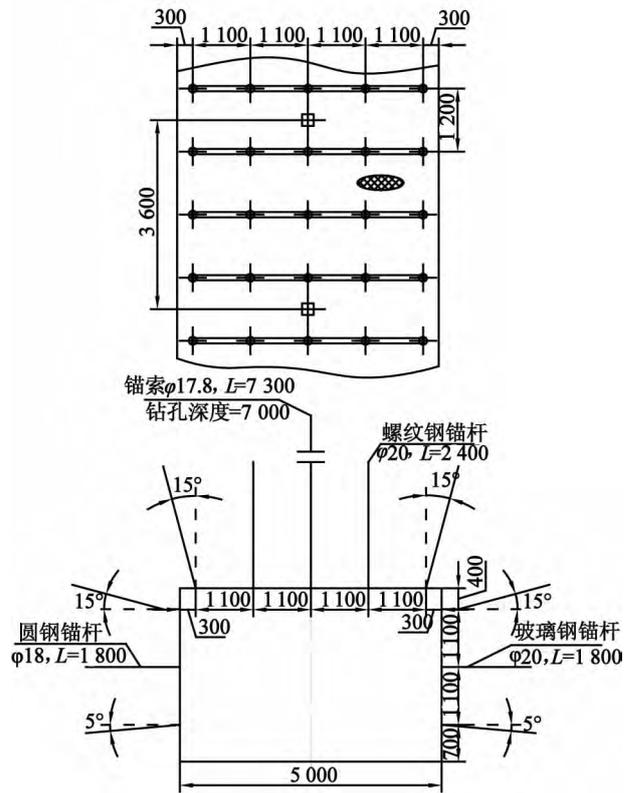


图3 B906辅运顺槽锚杆索支护新方案布置图(单位: mm)

Fig.3 The new scheme layout of B906 auxiliary transport crossheading of anchor cable supporting(unit: mm)

(2) 锚索支护

顶板锚索形式和规格:锚索采用 $\Phi 17.8 \text{ mm}$ 的钢绞线,长 7.3 m ,锚深 7 m 。锚索预紧力不低于 120 kN 。

锚固方式:每个锚索钻孔安装一个 K2335,2 根 Z2360 树脂药卷, K2335 在上, Z2360 在下。

锚索布置:巷道中间每排布置一根锚索,排距 3600 mm 。

托盘规格:锚索托板采用 Q235 钢,规格为 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 和 $90 \text{ mm} \times 90 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 两种配合使用。

4.2 巷帮支护

帮锚杆形式和规格:靠工作面一侧煤帮选用 $\Phi 20 \text{ mm}$ 玻璃钢锚杆,长度为 1.8 m 。靠煤柱一侧煤帮选用 $\Phi 18 \text{ mm}$ 圆钢锚杆,长度为 1.8 m 。玻璃钢锚杆初锚力 $\geq 30 \text{ kN}$,扭矩 $\geq 80 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。圆钢锚杆

初锚力 ≥ 50 kN 扭矩 ≥ 100 N·m。

锚固方式: 帮锚杆每孔使用 1 根 Z2360 树脂锚固剂。

锚杆布置: 锚杆间、排距 1 100 mm \times 1 200 mm。每排每帮布置 3 根锚杆, 最上一根距顶板 400 mm, 斜向上与水平方向成 15° 夹角; 最下一根距底板为 700 mm, 斜向下与水平方向成 $5^\circ \sim 10^\circ$ 夹角; 中间一根水平布置。

托盘规格: 两帮锚杆铁托板 200 mm \times 200 mm \times 10 mm, 高强塑料托板 $\Phi 100$ mm。

巷帮网片规格: 靠工作面一侧煤帮选用内有铁丝蕊的塑料网, 长 \times 宽 = 30 m \times 1.5 m; 靠煤柱一侧煤帮为 $\Phi 4 \times 80$ mm 金属焊接方格网; 长 \times 宽 = 3 m \times 1.3 m; 网片相互压茬 100 mm, 每 300 mm 用 14# 双股铁丝扎牢。

遇见断层、围岩破碎带、地应力异常等复杂地质条件, 应采取加强支护措施^[8]。

5 支护效果工程验证

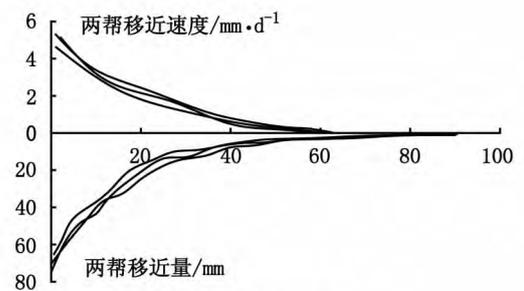
在 B906 辅运顺槽中距工作面 100、130 和 160 m 处各布置一个测站, 测站间距为 30 m, 测量巷道表面位移。从测站布置后到 B906 工作面推过测站后, 巷道断面收敛率很小, 两帮移近量最大不超过 80 mm, 顶底板移近量最大不超过 25 mm (见图 4)。在工作面推进期间, 辅运巷的顶板下沉量较小, 但两帮移近量不大, 说明巷道顶板控制较好。

6 结论

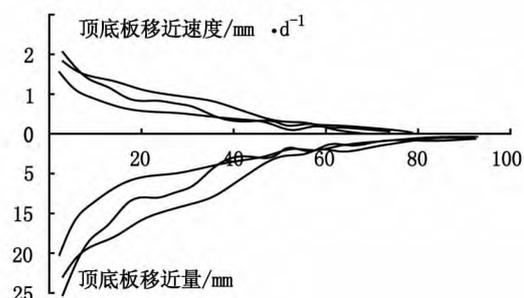
1) 厚煤顶煤巷变形破坏的主导因素为: 厚顶煤不易形成稳定的支护结构; 煤帮稳定性差; 地质构造; 开采扰动; 巷道断面大等。

2) 煤岩样采集测试与底板比压测试分别得出煤层及直接顶的几何力学参数指标, 底板允许比压值模糊综合评判得出 B906 辅运巷属于 III 类围岩, 从而确定出支护参数选择方向。

3) 设计出 B906 辅运巷支护参数, 并进行现场工业试验。位移变形观测结果表明: 顶底板移近量和两帮移近量较小, 围岩控制效果较好。



(a) 两帮移近量



(b) 顶底板移近量

图4 巷道围岩变形曲线图

Fig. 4 Curves of deformation of roadway surrounding rock

参考文献:

- [1] 张荣立, 李 铎, 何国纬. 采矿工程设计手册 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003.
- [2] 邢福康. 煤矿支护手册 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
- [3] 邹喜正. 煤矿巷道围岩稳定性分类 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995.
- [4] 刘玉堂. 我国缓倾斜、倾斜煤层回采巷道围岩稳定性分类研究 [J]. 煤炭学报, 1989, 14(3): 21-35.
- [5] 汪培庄. 模糊集合论及其应用 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983.
- [6] 邹喜正. 对模糊聚类分析中原始数据预处理研究 [J]. 煤矿开采, 1994(1): 17-20.
- [7] 王汉鹏, 李术才, 李为腾, 等. 深部厚煤层回采巷道围岩破坏机制及支护优化 [J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 19-23.
- [8] 郑钢鏢. 特厚煤层大断面煤巷顶板离层及锚固效应研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2006.

(责任编辑 王利君)