

文章编号: 1673-3363-(2013)06-0836-05

# 大断面软煤层大巷围岩控制优化设计

刘锦荣<sup>1</sup>, 康庆涛<sup>2</sup>

(1. 大同煤矿集团有限责任公司, 山西 大同 037003; 2. 华北科技学院安全工程学院, 河北 三河 065201)

**摘要** 受煤体强度低、水平地应力大、顶板赋存富含水层及泥岩底板稳定性差等多因素影响, 麻家梁煤矿大断面软弱煤层大巷遇到顶板下沉、底鼓严重的难题, 严重影响矿井的安全生产。以回风大巷为主要研究对象, 采用现场实测、理论分析、数值模拟等方法, 对巷道的围岩变形破坏规律、合理断面形式、底鼓控制方法及合理支护参数进行研究。经研究确定回风大巷顶板采用微弧拱形, 增加顶板排水管, 底板采用反底拱的结构形式, 全断面采用锚网索联合支护。现场应用表明, 经优化设计后的回风大巷能有效控制围岩变形, 满足矿井大巷保持长期稳定的要求。研究结果对大断面软弱煤层大巷的支护设计具有借鉴意义。

**关键词** 大断面; 煤层巷道; 围岩控制

**中图分类号** TD 353

**文献标志码** A

## Surrounding rock control optimal design of large section roadway in soft coal seam

LIU Jin-rong<sup>1</sup>, KANG Qing-tao<sup>2</sup>

(1. Datong Coal Mine Group Limited Company, Datong, Shanxi 037003, China;

2. School of Safety Engineering, North China Institute of Science & Technology, Sanhe, Hebei 065201, China)

**Abstract** Affected by complicated factors such as large section, low strength of coal mass, high in-situ stress, rich water roof and Mudstone floor characterized by rheological, swelling and softening property, the roadway in Ma Jialieng Mine soft coal seam encounters heavy rock surrounding support problems of roof sag and floor heave. Consequently, the safe and orderly production was affected seriously. Taking the main air return way as a primary research object, the paper has studied the law of surrounding rock deformation and failure, reasonable section size and shape, support parameters and floor heave control method by means of field measurement, theoretical analysis, numerical simulation and so on. The research shows that micro cambered arch roof, drain-pipe installed in roof, inverted-arch floor, net and bolt support of whole section are the optimum combination of section form and support scheme. The field application tells that the optimized air return way surrounding deformation can be controlled effectively, which meets the requirements of keeping it stable for a long period. The achievements of this research will offer useful data for large section roadway support in soft coal seam.

**Key words** large section; coal roadway; control of surrounding rock

收稿日期: 2012-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174192, 50904063); 山东省自然科学基金项目(ZR2010FQ028); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金项目(07KF09); 江苏省“333工程”项目(BRA2010024); 中央高校基本科研业务费专项项目(2011QNB03)

作者简介: 刘锦荣(1971-), 男, 山西省大同市人, 硕士, 高级工程师, 从事采掘生产技术研发及管理工作。

E-mail: ljr7173@qq.com

Tel: 13008048602

麻家梁煤矿是同煤集团千万吨级矿井，设计生产能力 12.0 Mt/a。井田采用立井两水平开拓，第一水平埋深在 500 m 以上。矿井布置 4 条水平大巷：1 条辅助运输巷、1 条胶带运输巷和 2 条回风巷。大巷均采用矩形断面，巷道断面净宽最大达 5.6 m，净高最大达 4.2 m，采用锚网索喷联合支护形式。各大巷在开掘一段时间后，均遇到顶板下沉、底鼓严重的情况，必须不断返修，给生产带来严重影响。

鉴于开拓系统巷道服务年限长、巷道断面较大，且布置在软煤层中，在长期围岩压力和岩层水的影响作用下，要保证巷道长期稳定满足生产正常使用，必须对巷道断面形式、围岩控制方法和支护参数等进行系统和深入的研究<sup>[1-4]</sup>。本文通过对麻家梁回风大巷围岩控制与支护进行优化分析，确定了更为可靠、稳妥和经济的巷道支护方案。

1 工程地质与生产技术概况

麻家梁煤矿第一水平回风大巷沿 4<sup>#</sup>煤层顶板掘进。4<sup>#</sup>煤层厚 1.35~11.09 m，平均 6.32m，可采系数 100%。煤层结构较简单，一般含 2~3 层夹矸，夹矸以泥岩、碳质泥岩、砂质泥岩为主，也有高岭质泥岩及粉砂岩，厚度变化较大，一般在 0.5 m 以下。顶板以泥岩及砂岩为主，底板以泥岩、高岭质泥岩为主，煤层顶底板情况如表 1 所示。

表 1 4<sup>#</sup>煤层顶底板情况表  
Table 1 Roof and floor conditions of 4<sup>#</sup> coal seam

顶底板名称	岩石名称	厚度/m	岩性特征
基本顶	岩屑含砾粗砂岩 K5	0~13.2 5	浅灰色，灰褐色，可相变为中细粒砂岩
直接顶	中、粗、细砂岩	0~5.93 1.13	灰黑色
伪顶	粉砂岩	0~0.5 0.08	黑色，极不稳定
直接底	粉砂质泥岩	1.84	褐色，高岭质矿物含量较高
基本底	中砂岩，粗砂岩细砂岩	0.50~5.99 1.10	浅灰色，可相变为中细粒砂岩

4<sup>#</sup>煤层属于软煤，硬度系数小于 1。K5 砂岩为富含水层，煤层顶底板强度中等，但具有明显的流变性、膨胀性和软化性特征，特别是在水作用下，强度下降，变形增大。

矿井回风大巷原设计采用锚网喷和锚索联合支护方式，锚杆规格  $\Phi 20\text{ mm}\times L2400\text{ mm}$ ，间排距 700 mm $\times$ 700 mm，采用高强树脂锚杆，锚索规格  $\Phi 15.24\text{ mm}\times L7000\text{ mm}$ ，间排距 2500 mm $\times$ 2500 mm，设计断面支护如图 1 所示。

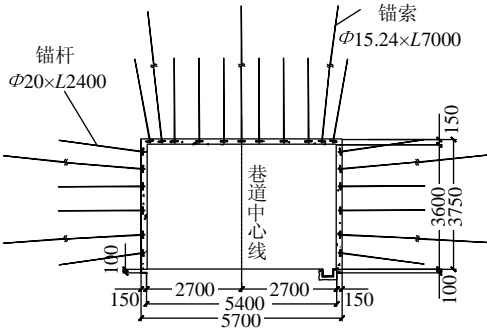


图 1 水平回风大巷支护图 (mm)  
Fig.1 Support chart of level return air roadway

2 巷道围岩变形破坏特征

1) 巷道顶板存在 2 种变形破坏基本类型：离层挠曲破坏和剪切破坏。巷道顶板下部岩层在其中心处与紧靠它的上部岩层有分离的趋势，或由于自重作用而向下挠曲，当顶板由中部弯曲破裂与顶角处断裂而导致最终破坏，形成离层挠曲破坏。由于巷道两肩处的压应力较高，在应力重新分布的过程中如果应力超过顶、底板岩体的强度，则发生剪切破坏并形成剪切破坏楔块，当应力仍超过顶、底板的残余强度时，顶板将出现严重失稳，形成剪切破坏。

2) 巷道底板破坏形式以底鼓为主。

3) 两帮发生的破坏形式有压剪式、劈裂式和横拱式 3 种。当两帮岩体因破碎程度较低而尚有一定残余强度时，在较高支承压力的作用下，两帮将会发生压剪滑移式片帮。尚未完全破坏且垂直于层理的裂隙又较发育的岩体，被揭露后将失去横向约束，其应力状态也将处于双向应力状态，此时，在支承压力的作用下两帮会发生压裂式破坏，从而产生劈裂式片帮。当巷道开挖围岩被揭露后，将因横向膨胀力的作用而产生鼓出变形，若此时两帮煤体已完全破碎，但受帮部锚杆的维系作用，在垂直压力作用下，煤壁将形成横向鼓出片帮。

生产实践表明，影响巷道安全和应用效果的主要是巷道顶板下沉失稳和底鼓造成的围岩失稳运动，是控制的关键部位，应针对巷道顶底板稳定性控制进行优化设计。

3 回风大巷顶底板稳定性控制设计

3.1 断面形式优化

3.1.1 顶板断面选形

矩形断面巷道系直线型周边，最易出现受拉区，受力状态差，围岩容易产生张拉力，导致巷道易变形破坏，不利于巷道的稳定，麻家梁矿各大巷

均采用矩形断面巷道,这就增大了大断面巷道的支护难度。

根据材料力学,在同一外荷、跨度、材料和截面的情况下,拱可以比梁多负担 10 倍的外荷载<sup>[5-6]</sup>。根据围岩压力的分布特点,确定合理的巷道断面,就是使支护结构(包括组成支护的围岩)处于合理的受力状态,尽量减少或消除支护结构中的弯曲应力。麻家梁矿水平地应力大于垂直应力,侧压系数 $\lambda > 1$ ,实测约为 1.25。为了使巷道能够处于更为有利的受力状态,巷道顶板应改为横向低顶椭圆拱形,即微弧拱形。

回风大巷跨度 5.7 m,根据轴变论<sup>[7]</sup>,可得到最优拱高为 2.54 m。考虑到巷道顶板过高,断面利用率低,综合考虑施工方便,顶板微弧拱高取为 1.2 m。

### 3.1.2 底板加强控制

巷道底板为松软的煤层,在水平应力的挤压作

用下,底板极易发生底鼓。为了防止巷道底鼓导致巷道失去基本功能,应对巷道底板的稳定性充分考虑。优化设计后对底板控制的方案为采用配筋混凝土保护:反底拱中间矢高为 800 mm,第 1 次铺设 100 mm 厚 C30 高性能混凝土为反底拱,铺设 7 d 后打底板注浆锚杆,采用  $\Phi 26 \text{ mm} \times L 2800 \text{ mm}$  中空注浆锚杆,间排距均为  $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ ;对反底拱注浆后,再浇筑 300 mm 厚 C30 钢筋高性能混凝土地坪。底板与反底拱之间的空间用炉渣充填,起缓冲作用,形成中间 800 mm、两侧 300 mm 厚的切圆反底拱缓冲板梁结构。

根据太沙基理论<sup>[8]</sup>,巷道底板压力为 0.28 MPa,采用“理正”结构计算软件确定巷道底板配筋。巷道底板采用  $\Phi 10 \text{ mm}$  的 HPB235 钢筋浇筑的单向板,纵横配筋皆为  $\Phi 10 \text{ mm} @ 80 \text{ mm}$ ,箍筋采用  $\Phi 8 \text{ mm} @ 80 \text{ mm}$ 。巷道底板配筋如图 2 所示。

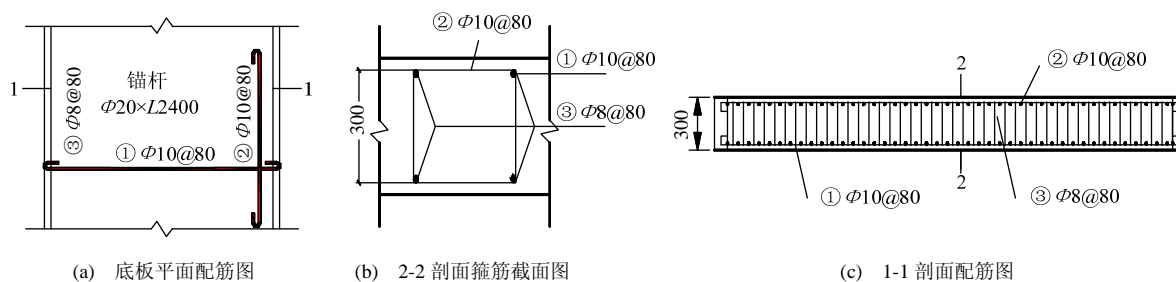


图 2 巷道底板配筋图 (mm)

Fig.2 Roadway floor reinforcement chart

### 3.2 支护参数优化

以往的工程实践中,模糊数学及灰色理论已经运用在煤巷的设计及评价中,达到了较好的实践效果<sup>[9-10]</sup>。此处以巷道原设计方案为基础,以数值模拟为手段,采用灰色关联分析方法对巷道支护参数进行优化分析。图 3 为回风大巷 UDEC 计算模型。

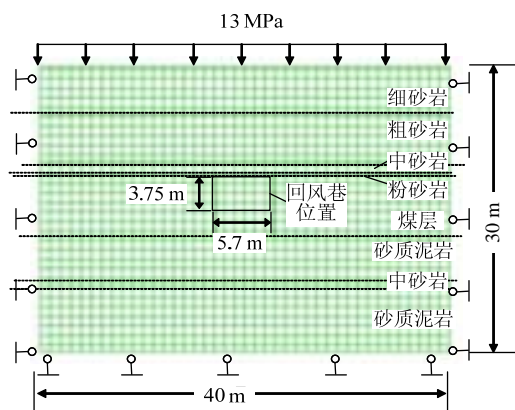


图 3 回风大巷 UDEC 模型

Fig.3 Main return air roadway UDEC model

模型宽 $\times$ 高=40 m $\times$ 30 m。上部边界为应力边界,经上覆岩土重力作用换算为均布荷载 13 MPa,侧压系数取 1.25,水平应力则为 16.25 MPa;下边界和左右两边为固定边界。模拟以实测煤岩物理力学参数(表 2)为基础,采用摩尔模型。

优化参数的选取要满足 3 个基本要求:首先,要满足巷道的稳定性;在稳定的前提下再考虑满足功能要求和经济的合理性。考虑矿井实际,优化方案中采用  $\Phi 20 \text{ mm} \times L 7000 \text{ mm}$  的锚索。优化设计共选取了 16 种方案,通过 UDEC 软件模拟出不同支护方案的顶底板和两帮位移,同时考虑经济因素计算出了每种支护方案的每延米的用钢量,如表 3。

基于巷道变形控制的设计思想,每个评价指标的最小值对应的方案即为该指标相应的最优方案。回风大巷顶板最小位移对应的局部优化方案为方案 11,底板最小位移对应的局部优化方案为方案 16,帮部最小位移对应的局部优化方案为方案 5,即回风大巷用以对比的优化方案为 5, 11, 16。

表 2 岩石力学参数  
Table 2 Rock mechanical parameter

编号	岩性	厚度/m	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
1	粗砂岩	8.5	2 530	750	230	1.75	2.1	35
2	细砂岩	5	2 440	740	235	1.8	2.2	36
3	粗砂岩	4.5	2 530	750	230	1.75	2.1	35
4	中砂岩	1.5	2 580	710	220	1.73	2.0	37
5	粉砂岩	0.5	2 450	650	200	1.7	2.0	35
6	煤层	6.3	1 450	350	150	0.8	1.2	31
7	砂质泥岩	3.5	2 520	1 000	250	1.3	1.8	34
8	中砂岩	1.5	2 580	710	220	1.73	2.0	37
9	砂质泥岩	18.7	2 520	1 000	250	1.3	1.8	34

表 3 回风大巷优化计算结果  
Table 3 Optimal calculation result of main return air roadway

序号	锚杆长度/m		锚杆间排距/mm	顶板位移/mm	底板位移/mm	帮部位移			用钢量/(kg·m <sup>-1</sup> )
	顶板	两帮				左帮/mm	右帮/mm	平均/mm	
1	2.4	2.2	600×600	58.1	85.9	68	69	68.5	184.76
2			700×700	58.5	87.4	74.4	74.7	74.6	158.38
3			800×800	58.7	86.7	71.7	72.7	72.2	138.55
4			900×900	59.1	87.3	73.5	73.6	73.6	123.14
5	2.6	2.4	600×600	58.1	85.6	67.9	68	68	201.56
6			700×700	58.5	87.8	74.2	73.9	75.6	172.78
7			800×800	58.8	88.1	71.5	71.4	71.5	151.15
8			900×900	59	86.8	72.7	73.9	73.3	124.33
9	2.8	2.6	600×600	57.8	86.6	68	68.1	68.1	218.35
10			700×700	58.3	86.6	73.8	73.4	73.6	187.17
11			800×800	57.5	85.4	70.6	71.1	70.9	163.75
12			900×900	58.9	86.6	73.3	72.6	72.4	145.52
13	3.0	2.8	600×600	57.7	86.1	68.1	68.6	68.4	235.14
14			700×700	58.2	87.6	75.9	74.8	75.5	201.57
15			800×800	58.5	86.4	70.7	72	71.3	176.34
16			900×900	58.8	85.2	72.9	72.5	72.7	156.72

在评价指标中，费用、工期、相对收敛量属于越小越好的成本型指标，相应的因素指标应满足  $x_j^0 = \min[x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}]$ 。考虑的因素有顶板位移、底板位移和两帮平均位移，相对理想方案的因素指标为  $X_0 = [57.5, 85.2, 68, 156.72]$ 。根据相近工程的指标确定方法，得到的理想方案矩阵是特征量矩阵的增广矩阵(前 3 行为特征量矩阵)：

$$\overline{X} = \begin{bmatrix} 58.1 & 85.6 & 68 & 201.56 \\ 57.5 & 85.4 & 70.9 & 163.75 \\ 58.8 & 85.2 & 72.7 & 156.72 \\ 57.5 & 85.2 & 68 & 156.72 \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据灰色关联分析方法<sup>[11-12]</sup>，回风大巷的 3 种局部优化方案对应于相对理想方案的安全系数分别为  $u_i = [u_5 \ u_{11} \ u_{16}] = [0.50 \ 0.78 \ 0.63]$ ，因此选择

方案 11 为整体最优方案，即锚杆长度顶板为 2.8 m，两帮为 2.6 m，锚杆直径为 20 mm，锚杆间排距为 800 mm×800 mm，锚索直径为 20 mm，长度为 7 m。

3.3 顶板排水

麻家梁矿水环境复杂，4<sup>#</sup>煤顶板 K5 砂岩为富含水层，为了防止水对围岩稳定性的影响和对锚杆锚索的腐蚀作用，设计采用直径为 50 mm 的 PVC 排水管进行排水，长度为 7 m，在巷道中每隔 5 m 打一组，深入到 K5 砂岩中(2 根)。

4 现场应用效果

根据巷道变形破坏特征，优化分析确定麻家梁矿回风大巷断面及支护方案如图 4 所示。对优化后的巷道支护方案进行了现场试验，并进行了 3 个月

的顶板离层、底鼓量的监测。监测结果表明,顶板离层量由优化前的 20~40 mm 下降为优化后的 0~5 mm,底鼓量由优化前的 200~600 mm 下降为优化后的 10~30 mm,巷道的围岩变形得到有效控制。

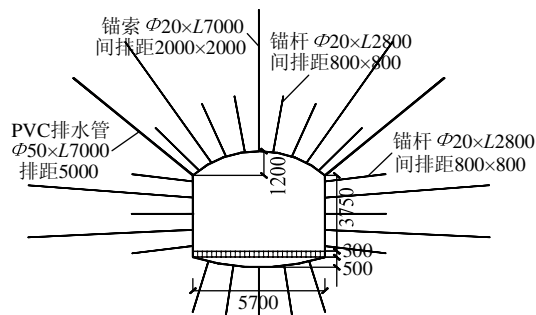


图4 回风大巷优化方案实施图 (mm)

Fig.4 Practice chart of main return air roadway optimal scheme

## 5 结 论

1) 大断面、煤体强度低、较大的水平地应力、顶板赋存富含水层及泥岩底板的流变性、膨胀性和软化性是造成麻家梁矿大巷围岩难以控制的主要原因。

2) 为控制麻家梁矿特定条件下大断面巷道围岩的过量变形,将矩形巷道优化为顶部微弧形断面、底板采用强力注浆反底拱的结构形式,且增加顶板排水管。

3) 通过灰色关联分析,对大断面巷道全断面锚网索联合支护参数的优化结果为:顶板锚杆长度 2.8 m,两帮锚杆长度 2.6 m,锚杆直径为 20 mm,锚杆间排距为 800 mm×800 mm;锚索长度为 7 m,直径为 20 mm。

4) 实践表明,优化后的支护方案能有效控制大断面软煤层大巷的围岩变形,满足矿井对于大巷保持长期稳定的要求。

## 参考文献:

- [1] 刘其福,刘宏. 软岩矿井开拓巷道支护研究[J]. 山西建筑, 2009, 35(32): 115-116.  
LIU Qi-fu, LIU Hong. Supporting study of soft rock mine roadway development[J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(32): 115-116.
- [2] 郭爱生. 浅谈开拓巷道锚网喷联合支护技术应用研究[J]. 中国矿业, 2011, 20(8): 92-94.  
GUO Ai-sheng. On the open net spray bolt support technology[J]. China Mining Magazine, 2011, 20(8):

92-94.

- [3] 何满潮,杨军,杨生彬,等. 济宁二矿深部回采巷道锚网索耦合支护技术[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(3): 23-26.  
HE Man-chao, YANG Jun, YANG Sheng-bin, et al. Coupling support technology with bolt/steel mesh/anchor for deep mining gateway in Jining No.2 mine[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(3): 23-26.
- [4] 辛亚军,勾攀峰,负东风,等. 大倾角软岩回采巷道失稳特征及支护分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(5): 637-643.  
XIN Ya-jun, GOU Pan-feng, YUAN Dong-feng, et al. Instability characteristics and support analysis on surrounding rock of soft rock gateway in high-pitched seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(5): 637-643.
- [5] 南培珠,孙鑫,王金安. 与地应力耦合的软煤巷道断面形状[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(4): 419-422.  
NAN Pei-zhu, SUN Xin, WANG Jin-an. The sectional shape of roadway in soft coal coupling with stress field [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(4): 419-422.
- [6] 杜云海. 材料力学[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2012: 112-128.
- [7] 于学馥. 轴变论和围岩变形破坏的基本规律[J]. 铀矿冶, 1982, 1(1): 8-17.  
YU Xue-fu. Fracture of rocks surrounding underground excavations[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1982, 1(1): 8-17.
- [8] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 334-336.
- [9] 刘东,刘德茂. 采矿方法的一种系统的选择方法[J]. 中国矿业, 1992, 1(1): 37-42.  
LIU Dong, LIU De-mao. A systematic methodol ogy for mining system selecting[J]. China Mining Magazine, 1992, 1(1): 37-42.
- [10] 田金华,李栋祥,徐建荣. 开拓系统优化选择的灰色局势决策[J]. 矿业研究与开发, 2003, 23(5): 20-22.  
TIAN Jin-hua, LI Dong-xiang, XU Jian-rong. Grey state strategic decision on the optimal selection of development system[J]. Mining Research and Development, 2003, 23(5): 20-22.
- [11] 易德生,郭萍. 灰色理论与方法——提要·题解·程序·应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 25-33.
- [12] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 122-162.