文章编号:1673-3363(2007)02-0235-04

复合性软岩巷道联合支护优化设计

余伟健[1]，高 谦[1]，宋建国[1,2]

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室，土木与环境工程学院，北京 100083；
2. 山西华晋焦煤公司 沙曲煤矿，山西 柳林 033300)

摘要：为解决复合性软岩巷道的支护参数问题，针对沙曲矿某工作面平巷进行了锚固支护优化设计. 分析了松动圈及离层情况，根据松动圈理论及组合拱理论，并应用锚索的悬挂作用确定了耦合承载区域，并提出耦合支护系统概念. 根据巷道稳定安全系数、顶底板相对收敛率和两帮相对收敛率这 3 个评价指标对 3 个方案进行了数值计算，给出了巷道锚固支护优化设计参数，确定了最优支护方案. 理论计算和现场应用表明：此种锚索联合支护方案效果显著.

关键词：复合性软岩；联合支护；耦合承载区；优化

中图分类号：TD 353 **文献标识码**：A

Optimization Design of Combined Supporting for Complex Soft Rock Roadways

YU Wei-jian[1], GAO Qian[1], SONG Jian-guo[1,2]

(1. State Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Civil & Environment Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Shaqu Mine, Huajin Pyro-Coal Corporation, Liulin, Shanxi 033300, China)

Abstract: In order to solve the problem of supporting parameters for complex soft surrounding rock roadways, the bolting support for the entry of working face of Shaqu Coal Mine was optimistically designed. Based on the broken rock zone theory and the combined arch theory, we analyzed the broken rock zone and the bed separation. According to the hanging effect of anchor cable, we determined the coupled loading area and proposed a new concept of coupling supporting. Three different support schemes are put forward and numerically calculated based on three evaluating indexes—the safety index of roadway stabilization, the relative convergence rate of roof and floor, and the relative convergence rate of both sides. Both theoretical calculation and practical application show that the combined support scheme has a very good supporting effect.

Key words: complex soft surrounding-rocks; combine supporting; coupling supporting zone; optimization design

由于围岩呈弱软破碎结构及其变形机理的复杂性造成了复合性顶板难支护问题. 如何确定在复杂围岩条件下的复合顶板承载圈大小，如何进行支护参数选取，进行软弱不稳定巷道的支护研究及其设计优化，是正确指导沙曲矿锚固支护设计的必要保证. 目前支护参数优化设计研究已经将传统的弹塑性力学计算方法和计算机技术有效地结合起来，通过计算松动圈的大小、顶层离层位置、上覆岩体

收稿日期：2006-02-11
基金项目：华晋焦煤公司攻关项目(200609)
作者简介：余伟健(1978-)，男，江西省都昌县人，博士，从事岩石力学、地下工程稳定性分析及数值模拟方面的研究.
E-mail：ywjlah@163.com **Tel**：010-62348596

万方数据

压力及支护结构的可靠度等来设计并优化支护参数[1-4]. 因此,本文针对该矿某采区巷道进行松动圈及离层分析,确定承载圈大小,应用决策优化的评价指标来进行预应力锚索支护参数优化研究.

1 工程地质特征

井田内煤系岩层主要为碎屑岩及碎屑岩夹碳酸盐岩沉积. 典型柱状如图1,4#煤基本顶为中粒砂岩,厚度为4.32 m,直接顶为砂质泥岩,厚度为3.45 m. 此工作面地面高度平均为650 m,覆盖岩层的平均容重为2 700 kg/m³,正在开采的是4号煤,根据岩石物理力学试验资料可知,各参数取其平均值作为研究的物理力学参数,如表1.

层厚/m	柱状	岩石名称	岩性描述
2.00		砂质泥岩	砂质泥岩
1.16		3#煤	结构均一,内生裂隙发育
2.38		砂质泥岩	深灰色砂质泥岩,上部含大量植物化石
4.32		中粒砂岩	深灰色中砂岩,主要为石英,长石次之,泥质填隙物,均匀层理
1.93		砂质泥岩	深灰色砂质泥岩,含植物叶片化石
1.52		中粒砂岩	灰色粉砂质中砂岩,底部为0.2 m的泥岩
2.42		4#煤	参差状断口,玻璃光泽,结构简单
3.12		细粒砂岩	灰褐色细粒砂岩,均匀层理,顶部为0.3 m的泥岩
2.65		泥岩	灰黑色泥岩,中厚层状,泥质结构,均匀层理
2.78		5#煤	
		K_3砂岩	浅灰色中砂岩,均匀层理,顶部为0.3 m的泥岩

图1 某工作面典型综合柱状图

Fig. 1 Columnar section of one working face

表1 巷道顶底板岩层物理力学参数

Table 1 The physical-mechanical parameters of roadway roof

序号	岩性	厚度 h/m	容重 γ/(kg·m^{-3})	弹性模量 E/GPa	剪切模量 S/GPa	抗拉强度 σ/MPa	泊松比 μ	内摩擦角 φ/(°)	黏聚力 C/MPa
1	砂质泥岩	2.00	2 500	1.05	0.43	1.81	0.22	26	2.70
2	3#煤层	1.16	1 600	0.45	0.19	1.43	0.19	18	0.50
3	砂质泥岩	2.38	2 500	1.05	0.43	1.81	0.22	26	2.70
4	中粒砂岩	4.32	2 400	1.24	0.50	2.91	0.24	31	3.31
5	砂质泥岩	1.93	2 500	1.05	0.43	1.81	0.22	26	2.70
6	中粒泥岩	1.52	2 350	1.24	0.50	1.27	0.24	31	3.31
7	4#煤层	2.42	1 600	0.45	0.19	1.43	0.19	18	0.50
8	细粒砂岩	3.12	2 640	1.65	0.64	1.85	0.29	32	9.19
9	泥岩	2.65	2 300	0.38	0.15	1.12	0.25	20	3.21

2 关键承载圈位置的确定

2.1 锚杆支护区分析

某工作面上下平巷规格为:2.5 m(高)×4.5 m(宽),依据围岩松动圈分类方法,当松动圈 $L_p>1.5$ m时,为大松动圈围岩状态. 该工作面上下平巷围岩已经表现出软岩的工程特性,矿压显现特征表现为:压力大,围岩变量大,变形时间长,并产生底鼓现象. 采用BA-II型围岩松动圈测试仪进行测试,松动圈的平均值一般达到1.6 m,最大者达到2.1 m,因此,当应用锚杆支护设计时,为保证巷道的安全,锚杆长度应在1.6~2.2 m.

组合拱的厚度由下式确定[5]

$$b' = (L\tan\alpha - a')/\tan\alpha\ , \qquad (1)$$

式中:b'为组合拱厚度;L为锚杆的有效长度;α为锚杆在围岩中的控制角;a'为锚杆的间距.

2.2 锚索支护区分析

应用组合梁原理来分析离层位置,确定关键稳定岩体的位置.

复合性顶板是系列岩层依次叠加而成的,其变形可以看成是多组组合板的弯曲变形. 根据材料力学可知,当各组合板的挠度不同,组合板间就会发生离层现象.

假定从4#煤直接顶板起为第1层,即表中序号为6的中粒泥岩作为第1层,设 $n=1$,因此,自5至1序号的岩层设计依次为 $n=2,3,\cdots,6$,根据组合梁原理,组合板中第 n 层对第1层形成的载荷 $q_{n,1}$[6-7]为

$$q_{n,1} = E_1 h_1^3 \sum_{i=1}^{n} \gamma_i h_i / \sum_{i=1}^{n} E_i h_i^3\ , \qquad (2)$$

式中:E_i 为各岩层弹性模量;h_i 为各岩层厚度;γ_i 为各岩层容重.

当组合板间出现离层时,则有 $q_{n,1}>q_{n+1,1}$,即

$$E_1 h_1^3 \sum_{i=1}^{n} \gamma_i h_i / \sum_{i=1}^{n} E_i h_i^3 > E_1 h_1^3 \sum_{i=1}^{n+1} \gamma_i h_i / \sum_{i=1}^{n+1} E_i h_i^3\ . \qquad (3)$$

化简得

$$E_{n+1} h_{n+1}^2 \sum_{i=1}^{n} \gamma_i h_i > \gamma_{n+1} \sum_{i=1}^{n} E_i h_i^3\ . \qquad (4)$$

计算时本应从4#煤直接顶岩层开始,但是工程实际经验和离层监测表明,此种软岩冒落高度一般大于5 m,因此计算此离层高度时应从第4层开始,即为基本顶中粒砂岩开始计算. 但是为了保证

万方数据

安全，及验证性，本文从 $n=3$ 开始，具体计算过程如下：

第 3 层中，由式(4)可知：

左式：$E_{n+1}h_{n+1}^2\sum_{i=1}^{n}\gamma_i h_i=194318.1$

右式：$\gamma_{n+1}\sum_{i=1}^{n}E_i h_i{}^3=19973.3$

由此可知，左式 > 右式，这说明第 3 层和第 2 层会产生离层.

其它岩层依此类推，由计算结果可知第 3 层以上的岩层都不发生离层现象，组合板的高度为距巷道直接顶，即 1.52+1.93+4.32=7.77 m 以上的高度，故支护体系关键载荷圈为距直接顶板 7.77 m 以上. 所以锚固端至少要进入第 3 层，即为基本顶才能保证安全可靠、才能有利于维护服务年限长的巷道，达到临时支护及永久性支护的双效作用. 根据现场经验及分析，巷道锚索长度一般控制在 7～9 m 比较合适.

2.3　耦合承载区的确定

由以上松动圈及离层分析得出，采用锚杆及锚索联合支护技术时，首先锚杆形成一个组合拱，抑制裂隙的进一步发展，在松动圈内形成一个承载结构体. 而锚索起的是悬吊作用，对顶板进行深部锚固，将锚杆支护形成的组合拱承载结构传递至坚硬顶板中. 这样形成了一种安全的力传递系统，沿巷道走向产生了对顶板的连续支撑点，产生较大预紧力从而减缓了顶板的下沉. 关键性地解决了复合层顶板上下层间的结合力低的问题. 将这种支护系统定义为耦合支护系统，由这个支护系统形成的主要承载区域称之为耦合承载区，如图 2 所示.

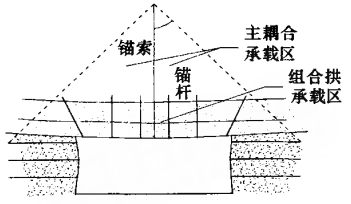

图 2　锚索和锚杆联合支护形成的耦合承载系统

Fig. 2　Coupling supporting system composed of cable and bolt supporting

但是巷道的稳定性是受多因素影响，根据煤系地层岩石具有强度指标低和变形指标高特点，需要进一步进行支护参数的优化.

3　联合支护优化设计

为了进行优化设计，一般采用巷道稳定安全系数、巷道顶底板相对收敛率和巷道两帮相对收敛率进行评价[4]. 巷道两帮中部以及拱顶与底板中部的位移是整个巷道变形最剧烈部位. 对推荐的 3 个方案(见表 2)进行了数值模拟计算，各评价指标结果值如表 3.

表 2　巷道支护方案参数

Table 2　Parameters of support patterns for roadway

方案	顶板锚杆支护参数			顶板锚索支护参数			两帮锚杆支护参数		
	长度/m	数量/根	排距/m	长度/m	数量/根	排距/m	长度/m	每一帮锚杆数/根	排距/m
1	1.8	6	1.0	6.0	2	3.6	1.8	3	1.0
2	2.0	6	1.0	6.0	1	2.0	1.8	3	1.0
3	2.0	6	1.0	8.0	1	2.4	1.8	3	1.0

表 3　巷道数值试验的评价指标值

Table 3　Evaluating index for computing experiment of roadway

方案	最大位移矢量/cm	顶底板位移/cm		相对收敛率/%	两帮位移/cm		相对收敛率/%	稳定安全系数
		顶板	底板		左帮	右帮		
1	28.78	−28.17	11.73	15.91	12.25	−12.29	5.53	1.197
2	18.56	−16.24	9.46	10.30	10.42	−10.58	4.67	1.295
3	18.05	−14.72	8.47	9.28	10.70	−10.49	4.71	1.356

最终得出的最优方案为 3 方案(见支护断面图 3)，该方案巷道围岩位移矢量、塑性区及最大主应力如图 4,5. 从图 4 中可以看出采用这种支护方案后，顶板位移明显减少，而底板和两帮位移基本得到控制，塑性区明显减少，大大改善了围岩的力学性质；从图 5 中可以看出，围岩应力环境非常好，顶、底板都处于比较有利的应力中，只有巷道 4 个角点产生应力张拉区. 总体来说，此种优选方案从技术上，理论上都已经达到了效果.

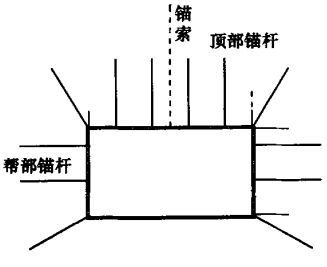

图 3　优化后的支护巷道断面

Fig. 3　Section of supporting roadway after optimizing

万方数据

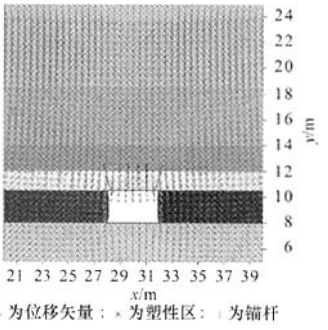

图4 支护巷道围岩位移矢量及塑性区
Fig. 4 Displacement vector and plastic map of supported roadway

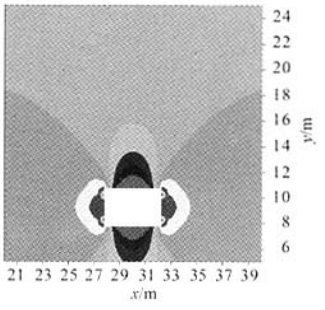

图5 支护巷道围岩主应力密云图
Fig. 5 Max stress map of supported roadway

4 结 论

1）锚杆支护在松动圈内形成组合拱作用，对各离层及破碎岩体进行锚固；锚索对锚杆形成的组合拱起到悬挂作用，将力传递到岩体深部中. 因此锚杆及锚索联合支护是一个耦合系统，形成一个耦合承载区域，最终将软弱破碎岩体转化成一个完整承载体，从而使巷道的稳定性大大提高. 因此，锚杆和锚索联合支护可以明显改善复合顶板软弱围岩的力学性质.

2）考虑到支护参数优化设计首先应从宏观上分析巷道的松动圈大小及不稳定程度，确定不发生离层的稳定岩层位置，从而确定锚固端位置，再从微观量进一步进行优化，考虑到巷道收敛率、安全系数及最大位移矢量等及其相关因素的影响，最终确定最优方案. 所以，松动圈及离层位置分析对巷道锚固支护参数的选择有指导性作用，而各评价指标具有进一步的优化作用.

3）在支护设计时，一定要做到考虑周全，不但是从宏观变形上，还是从微观力学上，都得进行认真分析及研究，只有这样，才能保证矿井安全、高效地进行正常生产. 因此，支护参数优化设计受多种因素影响，应综合各种可能影响因素.

参考文献：

[1] 钱鸣高，刘听成. 矿山压力及其控制[M]. 北京：煤炭工业出版社，1991.

[2] 刘同有，马念杰，高 谦. 地下巷道工程可靠度分析[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，1998.

[3] 余伟健，高 谦，余良晖. 松散围岩强化支护技术研究及其可靠性分析[J]. 金属矿山，2006(6)：23-24.
YU Wei-jian, GAO Qian, YU Liang-hui. Research on enhanced support technique for loose wall rock and it reliability analysis[J]. Metal Mine, 2006(6): 23-24.

[4] 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)：861-864.
GAO Qian, LIU Fu-jun, ZHAO Jing. The pre-stressed anchor supporting design and parameters optimization for a coal tunnel affected by first mining [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 861-864.

[5] 杨锁振，王红军. 应用松动圈理论修正锚杆支护参数[J]. 山东煤炭科技，2001(5)：26-27.
YANG Suo-zheng, WANG Hong-jun. Apply loose circle theory to amend parameter of blot supporting [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2001(5): 26-27.

[6] 贾剑青，王宏图，李晓红，等. 深埋隧道软硬交替复合顶板岩体变形破坏分析[J]. 岩土力学，2005，26(6)：938-939.
JIA Jian-qing, WANG Hong-tu, LI Xiao-hong, et al. Analysis of deformation-failure for soft and hard multilayer roof of deeply buried tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 938-939.

[7] 王宏图，鲜学福，尹光志. 声发射凯塞尔效应岩体地应力测试的研究[J]. 煤炭学报，1997，22(5)：488-490.
WANG Hong-tu, XIAN Xue-fu, YIN Guang-zhi. Study on crustal stress measurement of rock mass by the Kaiser effect of acoustic emission in rock[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(5): 488-490.

万方数据