第 27 卷 第 4 期　　北 京 科 技 大 学 学 报　　Vol.27 No.4
2005 年 8 月　　Journal of University of Science and Technology Beijing　　Aug. 2005

JS 复合型软岩顶板条件下煤巷锚网支护技术

王树仁[1)]　何满潮[1,2)]　范新民[2)]

1) 中国地质大学岩土与地热工程创新基地，北京 100083　2) 中国矿业大学(北京)岩土工程研究所，北京 100083

摘　要　基于现场实践及工程地质调查，结合工程地质理论与大变形力学原理，确认了镇城底矿煤巷顶板具有节理化软岩的特点，并具有膨胀型和结构变形型的复合型变形力学机制．应用有限差分程序 FLAC^{2D}，进行了软岩顶板复合型变形力学机制向单一型转化的力学对策和支护参数优化的模拟分析，提出了锚网索联合支护形式和支护顺序．经现场工业性试验，成功解决了在采动压力下煤巷软岩顶板难以支护的难题．

关键词　软岩；支持；锚网；数值模拟；大变形

分类号　TD 353$^+$.6

锚杆支护技术已在国内外煤矿行业得到了普遍应用，成为煤矿发展高产、高效矿井建设必不可缺少的配套技术．在西山矿区镇城底矿推广该项技术存在以下主要问题：

(1) 1989 年 10 月，在试用锚杆支护过程中，曾发生过一次较大范围的冒顶，导致多人伤亡．

(2)镇城底矿与西山矿区其他矿相比地质条件更复杂，推广使用锚杆支护存在技术难度．

(3) 沿用传统的架棚支护，存在经济上浪费，工人劳动强度大，不能根本解决巷道变形日趋严重的局面．

可见，研究适合镇城底矿复杂顶板条件下的锚杆支护技术，对镇城底矿的安全生产和进一步提高经济效益，具有十分重要的意义．

1　工程地质构造

镇城底矿位于太原西山煤田的西北边缘．井田南北长约 6.5 km，东西长约 8 km，面积为 22.7 m^2．

从区域构造上看，西山煤田位于新华夏系第三隆起带与祁吕贺兰山字型构造东翼以及阳曲—盂县纬向构造带的复合交接部位，形成了以断层为主纵横交错切割的复杂地质构造．

井田含煤地层为石炭系太原组和二迭系山西组，煤层总厚 16.27 m，其中主要可采煤层为 2#，3#和 8#煤层，为肥煤和焦煤．

笔者对该矿南翼二采区的 22202 回采面进行锚网支护技术研究．该工作面整体呈向斜构造形态，煤层倾角为 2~6°，平均为 5°左右，开采深度 300~400 m，煤层厚度为 3.9~5.3 m，平均 4.5 m．预计该面沼气涌出量 0.72 m^3·t^{-1}，煤尘爆炸指数 30.31%，有爆炸危险性，煤层自然发火系数为Ⅲ级．回采巷道断面设计为矩形，掘进宽度 3.0 m，高度 2.5 m，净断面积 7.5 m^2．2#和 3#煤层的顶、底板岩性柱状如图 1 所示．煤层的直接顶为细砂岩，节理裂隙发育，淋水较大．

地层单位	岩柱性状 1:2000	煤层及标志层	层厚 /m	岩性描述
山西组			4.12	深灰色砂质泥岩
			2.15	灰白色中砂岩
		1	0.50	1# 煤
			1.23	灰白色细砂岩
			1.15	深灰色砂质泥岩
		2	2.17	2# 煤
			0.25	灰黑色炭质泥岩
		3	1.33	3# 煤
			0.65	灰色细砂岩
		4	0.90	4# 煤
			0.60	灰黑色砂质泥岩
		$4_{下}$	0.45	$4^{\#}_{下}$煤
			1.13	深灰色粉砂岩
			1.37	灰色细砂岩

图 1　煤层顶、底板岩性柱状图

Fig.1　Geological section of coal seams

收稿日期：2004-06-10　**修回日期**：2004-09-10

基金项目：国家自然科学基金重大项目(No.50490270)和教育部科学技术研究重大项目基金(No.10405)

作者简介：王树仁(1968—)，男，博士研究生

万方数据

2 煤巷支护分析

镇城底矿煤巷支护形式主要为三类:锚杆支护、锚网支护和锚杆与金属支架联合支护.各类支护巷道变形破坏的特点及原因如下.

(1) 单一锚杆支护在2#和3#煤巷中应用是失败的.巷道变形破坏特点是,施工锚杆后随工作面向前推进,顶板节理、裂隙开始增多、扩展,锚杆锚固力增大,锚杆之间裸露的顶板先发生局部漏顶,随后渐渐扩展,导致大面积顶板塌漏抽冒的后果;也出现了两帮肩窝锚杆木托盘被压碎,继而出现片帮,最后导致巷道顶板塌冒失稳.

出现上述现象的原因,主要是由于巷道顶板层理、节理发育,巷道开挖后经风化作用,微裂隙扩展,引起顶板围岩扩容,锚杆承压加大.单一锚杆与顶板仅在局部点接触,锚杆之间的顶板围岩由于扩容和岩体的碎胀力产生位移.当顶板围岩节理镶嵌程度差时,锚杆无法阻止锚杆间的顶板岩块冒落,从而发生由局部冒顶、扩展、最终导致巷道顶板的垮落失稳.

(2)锚杆加网(菱形网)支护效果也不理想.虽然网可以阻止锚杆间岩块掉落,但由于菱形网的延伸率大,柔性有余而刚性不足,形成许多"网兜",造成新的隐患,不能实现锚网与围岩间的耦合支护,难以阻止巷道围岩的最终失稳.

(3) 锚杆与金属支架联合支护形式既不经济又不合理,支护效果差.而1995~2001年镇城底矿多数回采巷道采用了该支护形式.其原因是:第一,理论上巷道开挖后应紧跟掘进面在架棚后立即打锚杆,但实际上锚杆往往滞后工作面20~30 m,造成该段距离内顶板已经离层,再打锚杆也就失去了控制利用围岩强度的意义.第二,先施工锚杆,在预计单一锚杆支护不能保证安全时再套金属支架加强支护,常造成支护成本加大,两种支护方式间也难以相互协调、相互补偿,而达到联合支护的目的.

(4)伴随上述支护形式出现的巷道底鼓,一般底鼓量都在300 mm以内,安装工作面时拉一次底即可,不会影响使用.由于2#和3#煤层直接顶黑灰色泥岩较厚,并具一定的膨胀性,且底板与4#煤软弱夹层间距小,4#煤层下也是具有膨胀性的泥岩,所以,底鼓严重,往往多次拉底仍不能满足断面需要,支架损坏严重,造成不得不停产,最后巷道报废的后果.

3 软岩巷道变形力学机制及支护对策分析

基于对镇城底矿地质构造、地层岩性、巷道围岩力学特性的研究和对现场大量煤巷支护状况、巷道破坏特征分析,确定矿巷道围岩具有复合型的变形力学机制类型:I_C,II_B,II_D,III_{BA},III_{CA},III_{DA}.即I_C微裂隙物化膨胀机制、II_B重力机制、II_D工程偏应力机制和III_{BA}弱层走向型、III_{CA}层理走向型及III_{DA}节理走向型三类结构变形机制.

根据对镇城底矿2#和3#煤层巷道围岩的力学属性及其变形力学机制的研究,可以看出该矿2#和3#煤层巷道之所以难支护,是因为该巷道围岩并非具有单一的变形力学机制,而是具有多种变形力学机制的"并发症"和"综合症"即复合型变形力学机制.因此,要想有效地进行该巷道的支护,靠单一类型支护方法的作用有限,必须采取联合支护方法.成功进行支护的关键技术是有效地把复合型变形力学机制转化为单一性[1].根据该矿煤巷围岩的地质特点和技术条件采取如下的支护对策.

(1) 优化断面设计. 掘进机割煤时消除伪顶泥岩,将矩形巷道的两个顶部直角改为圆弧型,实现由$I_C II_B II_D III_{BA} III_{CA} III_{DA}$型向$II_B II_D III_{BA} III_{CA} III_{DA}$型转化.

(2) 锚网布置三维优化. 加钢筋梯梁与网约束破碎顶板,顶板两根角锚杆改为斜向锚杆,底角两根帮锚杆向外下侧倾斜,实现由$II_B II_D III_{BA} III_{CA} III_{DA}$型向$II_B III_{BA}$型转化.

(3) 小孔径锚索支护,消除顶板软弱夹层影响,实现由$II_B III_{BA}$型向$II_B III_{BA}$型转化.

4 支护对策设计的数值模拟分析

4.1 计算模型及计算参数

选用美国Itasca公司开发的有限差分程序FLAC[2D]进行计算[2].依圣维南原理,计算范围取(宽×高)24 m×20 m,从巷道到模型边界按由密渐疏的原则划分网格7 680个(如图2所示).模拟静压情况,即垂直应力与水平应力均为自重应力8.25 MPa;巷道受采动影响时,垂直应力与水平应力同为自重应力1.5倍即12.50 MPa,模型上边界模拟上覆岩体的重量,两侧面限制水平移动,底面固定.采用Mohr-Coulomb破坏准则.模拟计

万方数据

算参数见表 1.

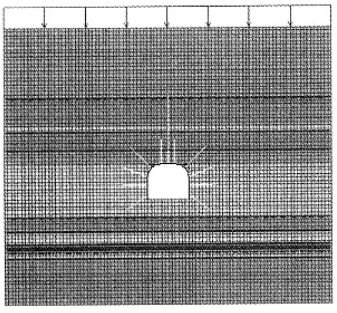


图 2 计算模型及网格划分

Fig.2 Mesh of the calculating model

表 1 计算模型力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the calculating model

岩性名称	密度 kg·m⁻³	内摩擦角 (°)	粘结力 MPa	体积模量 GPa	切变模量 GPa
砂质泥岩	2200	28	1.5	2.0	0.43
中砂岩	2650	40	3.0	6.3	3.40
1#煤层	1500	23	1.0	3.3	0.34
细砂岩	2700	42	3.0	6.5	3.50
砂质泥岩	2200	24	1.5	2.0	0.43
2#,3#煤层	1500	20	0.6	3.3	0.34
细砂岩	2700	42	5.0	6.5	3.50
4#煤层	1500	21	0.9	3.3	0.34
砂质泥岩	2400	32	2.0	6.5	2.70
4#上煤层	1500	23	1.0	3.3	0.34
粉砂岩	2650	40	3.0	6.3	3.40
细砂岩	2700	42	6.0	6.5	3.50

4.2 支护对策模拟方案

软岩巷道难支护的根本原因，是软岩巷道具有复合型的变形力学机制；成功进行软岩支护的关键是有效地把复合型变形力学机制转化为单一型. 因而，首先要针对不同的力学过程，进行相应的支护对策设计；相同的力学对策，不同的力学过程，其效果截然不同，所以接着要进行过程优化设计；最后对应着最佳力学过程再进行最优参数设计，这就是非线性大变形力学设计的基本思路[3].

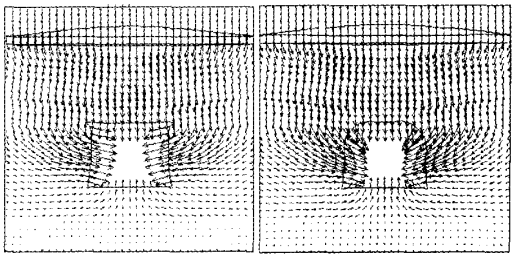
(1) 优化断面设计(模拟方案 1). 静压状态不考虑支护条件下，对矩形巷道顶部直角和顶部圆角两类断面形状进行数值模拟优化分析.

(2) 锚网优化设计(模拟方案 2). 在静压及采动影响条件下对锚网支护参数进行优化分析.

(3) 锚网索耦合支护(模拟方案 3). 在静压及采动影响条件下，进行锚网索耦合支护的数值模拟分析.

4.3 数值模拟结果及分析

(1) 优化断面设计. 不考虑支护时，在静压状态下开挖巷道，顶部直角和顶部圆角两种断面的巷道围岩位移及顶板离层位移矢量场图如图 3 所示. 由图 3 可见：顶部直角和顶部圆角巷道围岩的最大位移值分别为 192 和 129 mm，后者最大位移值较前者降低 32.8%；顶部直角和顶部圆角巷道顶板离层最大位移值分别为 108 和 88 mm，后者最大位移值较前者降低 18.5%. 另外，计算结果表明，顶部圆角巷道较顶部直角巷道围岩应力集中程度明显降低，进入塑性的单元数量也大量减少. 可见，将矩形巷道断面的两顶角由直角优化为圆角后的力学效果得到明显改善.

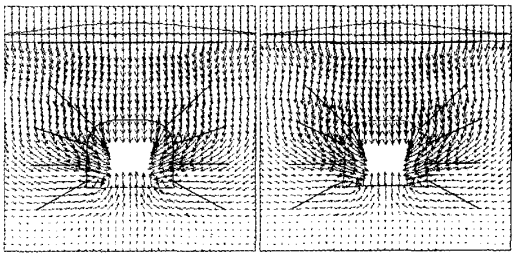


(a) 顶部直角断面 (b) 顶部圆角断面

图 3 巷道围岩及顶板离层位移矢量场

Fig.3 Displacement vector fields of the surroundings without supporting

(2) 锚网优化设计. 锚网支护巷道围岩位移及顶板离层位移矢量场图如图 4 所示. 由图 4(a) 和 (b) 可知：静压状态和动压状态巷道围岩的最大位移值分别为 51 和 131 mm，后者最大位移值是前者的 1.57 倍；静压状态和动压状态巷道顶板离层最大位移值分别为 38 和 101 mm，后者最大位移值是前者的 1.66 倍. 另外，在动压状态下，锚网支护巷道围岩进入塑性的范围大为扩展，远远超出了锚网支护所能控制的范围，同时加剧了顶板的离层位移，使顶板的支护状况进一步恶化，有



(a) 静压状态 (b) 动压状态

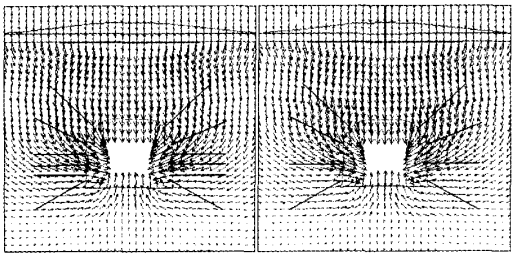
图 4 锚网支护巷道围岩及顶板离层位移矢量场

Fig.4 Displacement vector fields of the surroundings with the support of a bolting system

万方数据

可能出现围岩整体塌冒的危险,对顶板的安全控制极为不利.因此,对经受多次采动影响的煤巷,尤其对巷道顶板含软弱夹层的情况,考虑锚网索联合支护形式是十分必要的[4,5].

(3)锚网索耦合支护.如图5(a)所示,在静压状态下,锚网索耦合支护巷道围岩和顶板离层的最大位移分别为42和31 mm,较锚网支护巷道分别降低了17.6%和18.4%,较好地控制了巷道围岩产生塑性区的范围,增大了巷道围岩经受采动影响的安全储备.如图5(b)所示,在采动影响下,锚网索耦合支护巷道围岩和顶板离层的最大位移分别为100和76 mm,较锚网支护巷道分别降低了24%和25%,且巷道围岩的塑性范围基本上在锚网索控制的范围内,巷道围岩状况明显改观,而且较好地控制了顶板的离层现象,能够满足安全生产的要求.



(a) 静压状态　　(b) 动压状态

图5 锚网索支护巷道围岩及顶板离层位移矢量

Fig.5 Displacement vector fields of the surroundings with the support of a cable and bolting system

经支护方案优化分析和参数计算,确定支护形式和支护参数如下(如图6所示):顶锚杆为18#螺纹钢筋,长度2.0 m,用两卷树脂锚固剂锚固,规格K2455和Z2455,采用碟形高强度托盘.锚杆排距0.9 m,每排4根,间距0.9 m.

钢筋梯梁长2 880 mm,宽76 mm,由φ14 mm Q235钢筋焊制而成.采用菱形金属网护顶.锚索为φ15.24 mm高强度低松弛预应力钢铰线,长度5.5 m,采用1支K2455和3支Z2455树脂药卷锚固,锚固长度为2 297 mm.采用300 mm长的短π梁作为锚索托板.锚索布置在巷道顶板中央,间距为2.1 m.帮锚杆采用φ16 mm圆钢锚杆(钢A3),长度1.8 m,树脂药卷端头锚固,采用碟形高强度托盘.采用菱形金属网护帮.锚杆间距0.7 m,排距0.9 m,上排距顶板0.4 m.

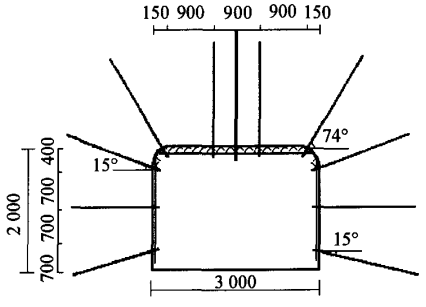


图6 锚网索支护断面

Fig.6 Cross section of the support of cable and bolting system

5 支护效果监测及分析

采用WRM-3型收敛计测量围岩表面位移;LBY-3型顶板离层仪量测顶板离层和岩体深部位移;应用CH90A荷载检测仪观察锚杆受力.

5.1 巷道表面位移

由巷道表面位移观测曲线(图7)可知:(1)裂隙扩容对巷道表面位移的影响时间为20 d左右,影响范围50 m左右;(2)在裂隙扩容期,顶底、两帮最大相对移近速度分别达到11和15 mm·d^{-1},平均分别为7和9 mm·d^{-1};(3)在稳定期,巷道围岩变形速度较小,顶底、两帮移近速度分别为0.35和0.25 mm·d^{-1}左右,并有逐渐减小的趋势.

测试结果表明,采用锚网索耦合支护综放回采巷道,巷道初期的收敛变形增长明显,在20 d左右变形速率明显减小,以后随着时间的增长逐步趋于稳定.

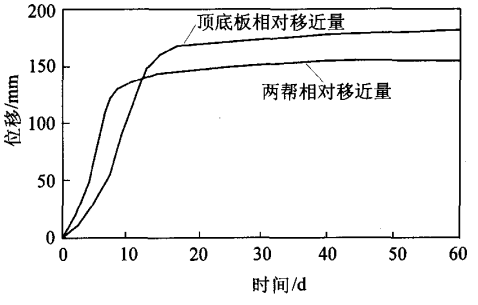


图7 锚网索支护巷道围岩表面位移曲线

Fig.7 Displacement curves of the surroundings with the support of a cable and bolting system

5.2 顶板离层位移

从巷道顶板离层位移曲线(图8)可见,顶板浅部离层比深部严重.在锚固范围0~2 m内离层量最大为21 mm,平均为17.5 mm;在锚固范围2~5.2 m内离层量最大为10 mm,平均为7.8 mm.

锚杆锚固范围内顶板离层量大主要与顶煤破碎承载能力低,巷道成型差,锚杆施工安装质量等有关;深部离层量小是由于锚索与锚网耦合

万方数据

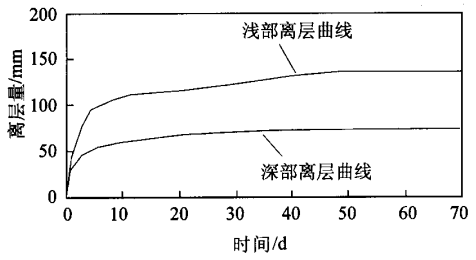


图 8 锚网索支护巷道顶板离层位移曲线

Fig.8 Displacement curves of the roof with the support of a cable and bolting system

形成的锚固体系充分发挥了作用.

5.3 锚杆与锚索受力

由锚杆与锚索受力曲线(图 9)可知:(1)顶锚杆轴向受力最大值为 49.3 kN,最小为 26.9 kN,表明顶板锚杆处于良好的锚固状态;(2)两帮锚杆受力最大值 44 kN,稳定后随着时间的变化,其载荷波动不大;(3)锚索轴向受力最大值为 142.5 kN,随着掘进工作面的推进和巷道变形的趋稳,其轴向力也趋于稳定.

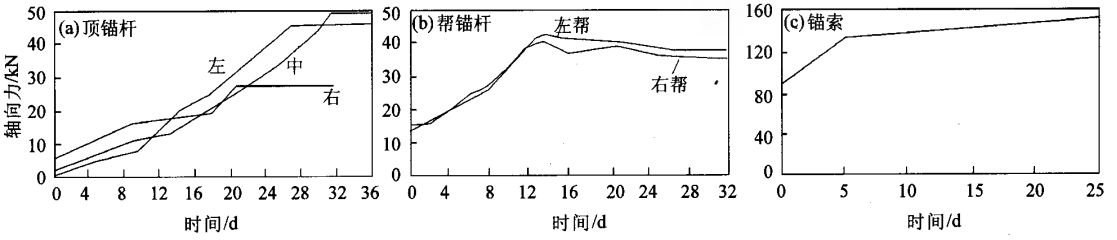


图 9 锚杆与锚索轴向受力随时间变化曲线

Fig.9 Radial force curves of cable and bolt with time

6 结论

(1) 采用工程地质学和现代力学相结合的方法,研究了镇城底矿煤层巷道围岩的工程地质条件和工程岩体的力学特性,确认镇城底矿 2#、3#煤层围岩为弱膨胀性、含软弱夹层、节理化不稳定软岩,即 JS 复合型软岩.

(2) 通过对该矿现有支护形式和巷道破坏情况的详细调查、统计,运用软岩工程力学原理将镇城底矿 2#和 3#煤层围岩的变形力学机制确定为 $I_C II_B II_D III_{BA} III_{CA} III_{DA}$.

(3) 采用 FLAC^{2D} 进行了各种支护方案的优化分析与参数设计,并根据巷道围岩变形量测结果,反馈优化了相应的支护设计方案.

(4) 确定的支护设计方案经过大量的工业性试验表明,采用锚网(索)耦合支护技术,不仅改善了巷道的支护状况,提高了掘进速度,降低了支护成本,而且给采煤工作面的快速推进创造了良好的安全生产条件.

参 考 文 献

[1] 何满潮,景海河,孙晓明. 软岩工程力学. 北京:科学出版社,2002

[2] FLAC^{2D}(3.3) User's Manual. Itasca Consulting Group Inc. Minnesota, 1996

[3] 何满潮,李春华,王树仁. 大断面软岩硐室开挖非线性力学特性数值模拟研究. **岩土工程学报**,2002, 24(4): 483

[4] 何满潮,王树仁. 断层构造控制的岩巷稳定性及其支护. **矿山压力与顶板管理**,2003, 20(增):14

[5] 何满潮,王树仁. 大变形数值方法在软岩工程中的应用. **岩土力学**,2004, 25(2):185

Bolt-net supporting technique for a gateway with JS composite roof

WANG Shuren[1], *HE Manchao*[2], *FAN Xinmin*[2]

1) Innovative Base of Geotechnical and Geothermic Engineering, China University of Geoscience, Beijing 100083, China

2) Geotechnique Institute, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

ABSTRACT Based on engineering practice and amounts of geological survey analysis, combined with the theory of engineering geology and the principle of large deformation mechanics, the compound deformation mechanics mechanism of soft rock with tiny swelling and structure-deformed type (JS) was affirmed in the roof of coal roadways in Zhenchengdi Coal Mine, China. FLAC was used to analyze the mechanical measures and optimize support parameters while the deformation mechanical mechanism of soft rock transforming from compound to simple. The results of field experiments showed that the compound supporting of bolt-wire mesh-anchor has successfully solved many difficult problems for years in coal roadways of Zhenchengdi Coal Mine.

KEY WORDS soft rock; support; bolting system; numerical simulation; large deformation

万方数据