

文章编号: 1000-7598(2012)11-3374-11

让压型锚索箱梁支护系统组合构件耦合性能分析及应用

王琦^{1,2}, 李术才¹, 李为腾¹, 李智¹, 江贝¹,
苗素军², 李海燕¹, 王德超¹, 王洪涛¹

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061; 2. 兖矿集团有限公司 博士后科研工作站, 山东 邹城 273500)

摘要: 对锚索梁支护及组合构件耦合支护研究现状进行了总结分析, 指出锚索梁支护系统组合构件耦合支护研究的必要性和意义。以“先控后让再抗”支护理念为指导, 研发出高强让压型锚索箱梁支护系统。通过层次分析法得到支护系统各构件权重值, 提出了支护系统构件整体性能利用率、耦合效率和围岩控制效果3个指标, 进行的13种数值试验对比方案结果表明: II 12c+ ϕ 22 锚索、II 12b+ ϕ 22 锚索和II 12a+ ϕ 17.8 锚索方案对应的支护系统均具有较高的耦合效率; 锚索型号对支护系统耦合效率具有较为显著的影响; 增大预紧力有助于进一步提高构件整体利用率、耦合效率, 改善围岩控制效果。设计制作了测力箱梁, 选择II 12b+ ϕ 22 锚索方案对应的锚索梁支护系统进行了现场试验, 测站监测结果显示, 支护系统在掘巷期间的整体性能利用率为54.51%, 构件耦合效率达到75.61%, 系统各构件达到了同步承载的效果, 巷道顶板沉降量和两帮移近量分别为148 mm和180 mm, 较好地控制了巷道围岩变形。

关键词: 箱型支护梁; 锚索让压环; 组合构件; 耦合性能; 数值试验; 现场试验

中图分类号: TD 313

文献标识码: A

Analysis of combination components coupling of pressure relief anchor box beam support system and application

WANG Qi^{1,2}, LI Shu-cai¹, LI Wei-teng¹, LI Zhi¹, JIANG Bei¹, MIAO Su-jun²,
LI Hai-yan¹, WANG De-chao¹, WANG Hong-tao¹

(1. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Post-Doctoral Scientific Research Station, Yankuang Group Company Limited, Zoucheng, Shandong 273500, China)

Abstract: The current research situations of anchor beam support system and composite members coupling support are summarized; and the necessity and significance of coupling support research of composite members in anchor beam support system are also researched. High strength pressure relief anchor box beam support system is developed, which is guided by the support idea: controlling at first, pressure yielding behind and then resistance. The coupling efficiency weights of composite members are obtained through the method of analytic hierarchy process; and utilization ratio of whole performance, coupling efficiency and control effect of surrounding rock of members in support system are put forward. The results of thirteen numerical test schemes show that coupling efficiency of II 12c+ ϕ 22 cable, II 12b+ ϕ 22 cable and II 12a+ ϕ 17.8 cable support system are good; the coupling efficiency of support system is markedly affected by cable type; increasing prestressing force is good for raising whole utilization ratio and coupling efficiency, and improving control effect of surrounding rock. The force measuring anchor box beams are designed and made; and the II 12b+ ϕ 22 anchor beam support system is applied to field test. Monitoring results show that the utilization ratio of whole performance is 54.51%; the coupling efficiency of members is 75.61%; members of system keep pace with each other in load supporting; roof settlement in coal roadway is 148 mm and walls displacement of roadway is 180 mm; and surrounding rock deformation is controlled well during roadway excavation.

Key words: box supporting beam; anchor yielding link; composite members; coupling efficiency; numerical test; field test

收稿日期: 2011-11-14

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(No. 51209127); 教育部博士点基金(No. 20110131110030); 山东省自然科学基金面上项目(No. ZR2009FM009)。

第一作者简介: 王琦, 男, 1983年生, 博士, 讲师, 主要从事地下工程支护及模型试验方面的研究。E-mail: chinawangqi@163.com

1 引 言

随着煤矿开采深度的增加,各种非线性力学现象愈来愈明显,在深部高地应力、高地温、高渗透压力和强烈的开采扰动条件下,深井巷道围岩表现出非线性大变形的力学特性,单一的支护方式已经无法满足深部煤巷的支护要求。国内外众多学者提出了利用不同支护组合构件对深部煤巷进行耦合支护的理念^[1-6]。耦合支护是指各个支护部分都能充分发挥自身作用、并且各支护方式之间相互作用,相互增强的一种联合支护方式。文献[1]根据深部复合顶板煤巷变形破坏机制提出了锚网索耦合支护设计方案。文献[2]介绍了 W 钢带和 M 钢带等组合构件耦合支护在千米深井巷道、深部沿空留巷、松软破碎围岩巷道等复杂困难条件下取得良好支护效果。文献[4]根据深部大断面软岩巷道变形力学机制提出了采用锚网喷+锚索+钢带+底角锚杆的耦合支护形式,有效地控制了深部大断面软岩巷道的大变形。文献[6]对高应力软岩巷道进行了耦合支护研究,利用指数蠕变模型得到了围岩变形随时间的变化规律,并给出了一次和二次耦合支护的合理支护时间。巷道变形破坏主要是由于支护体力学特性与围岩力学特性在强度、刚度以及结构上出现不耦合所造成的,且变形首先从关键部位开始,进而导致整个支护系统的失稳^[7]。因此,研究支护组合构件的耦合作用,充分发挥各个组合构件的效能,对于提高围岩自身承载能力,有效控制巷道围岩变形具有重要意义。

在深井煤巷中,围岩破碎比较严重,单个支护构件已无法有效控制巷道围岩变形,锚索梁支护系统已成为常用的支护形式,应用较多的是利用锚索结合工字钢、槽钢进行耦合支护。

工字钢或槽钢锚索梁在深部高地应力巷道支护中存在以下的问题和局限性^[8-16]。

①槽钢梁腹板与围岩紧贴,无让压空间,不能有效适度让压,实际应用中在锚索孔处容易出现应力集中现象,导致腹板经常被锚索穿透而失去作用。

②工字钢梁在使用时与煤岩接触面仅为翼缘部分,护表面积过小,对围岩表面近似施加两条线荷载,在围岩表面产生应力集中,过早产生较大的相对位移。一方面造成锚索预紧力过早损失;另一方面不能使锚索预紧力有效地扩散到大范围围岩中以抑制围岩的变形与破坏。

③槽钢和工字钢两者的支护强度和抗弯刚度都不够高,支护时在地应力作用下容易过早地产生

大变形,失去整体性,造成局部应力集中,不能有效控制围岩变形。

④支护成本高。工字钢和槽钢锚索梁中工字钢和槽钢都需平放(腹板在水平面),此种受力形式的惯性矩远小于其最大截面惯性矩,型钢刚度和强度不能充分发挥,材料利用率低,相对而言成本偏高。

⑤不具有让压性能或让压性能差。从现有资料看,锚索梁一般不具有专门的让压装置,不具让压能力或整体让压性能差。

以上问题的存在影响着锚索梁在深部巷道支护应用的效果。本文在上述研究基础上,针对工字钢、槽钢锚索梁存在的问题,对最新研发的让压型锚索箱梁支护系统及其各构件耦合性能进行对比研究,并进行了工程应用验证。

2 让压型锚索箱梁支护系统

2.1 系统组成

让压型锚索箱梁支护系统(见图 1)核心构件为让压型锚索箱梁(见图 2)和高强锚杆,同时配以钢带、托盘、金属网等附属构件。让压型锚索箱梁主要包括箱型支护梁(见图 3)、锚索让压环和高强锚索。

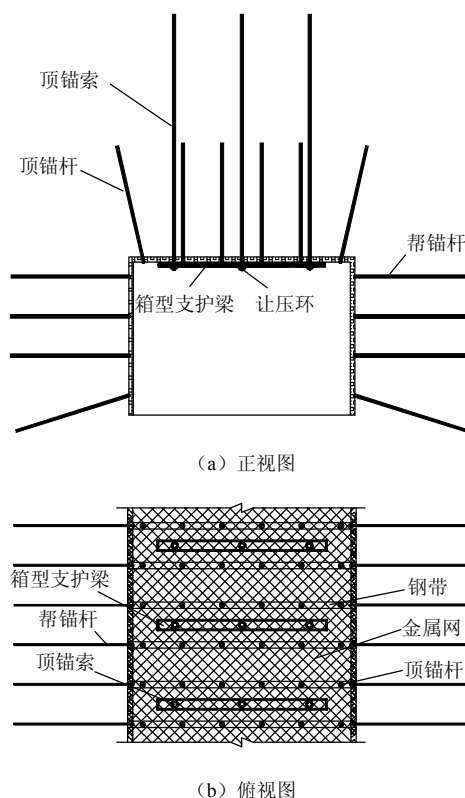


图 1 让压型锚索箱梁支护系统

Fig.1 Support system of pressure relief anchor box beam

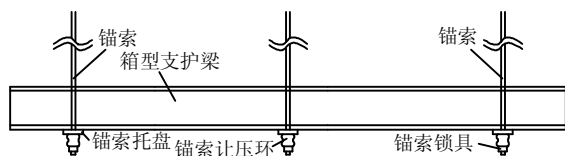


图2 让压型锚索箱梁
Fig.2 Pressure relief anchor box beam

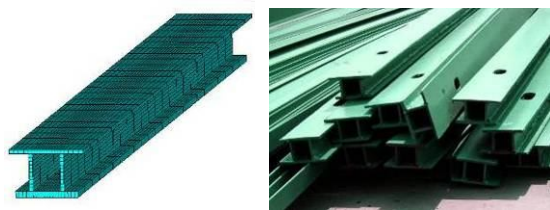


图3 箱型支护梁
Fig.3 Box supporting beam

2.2 系统功能及原理

对于深部高应力煤巷而言,在巷道开挖过程中,围岩离层、滑动、裂纹产生与扩展等扩容变形更加严重,“先让后抗”的支护理念已暴露出其局限性^[5]。因此,该系统采用“先控后让再抗”的设计理念对深部煤巷进行支护。

巷道支护初期,由高强锚杆及锚索箱梁的高强锚索提供高预紧力实现“先控”的要求。深部煤巷锚杆锚固区范围内的煤体一般处于破坏或者塑性状态,高强高预紧力锚杆及锚索可以在巷道掘进后主动及时给巷道表面围岩提供围压,有效减小锚固区内煤体围岩碎胀变形,使之形成具有较强承载能力的支护体,达到支护体与围岩共同承载的目的。

随着支护时间的推移,巷道支护压力变大,单纯依靠支护结构的支护抗力不足以控制高地应力巷道变形,当支护抗力达到一定限度时就需要进行适度让压,以缩小巷道断面为代价,换取支护体系不会因过高围岩压力而失效,同时充分发挥围岩的自承能力,即实现“后让”。此阶段主要通过系统的高性能锚索让压环来实现。

当围岩变形和支护抗力达到一个较高的水平时,就需要对巷道围岩实行强有力的控制,亦即“再抗”。一般来说,巷道围岩不可能因为第2阶段的“让”而最终趋于稳定。所以,在该支护过程的最后一个环节还应当是通过高刚、高强的系统支护来实现巷道围岩的最终稳定。该系统通过高强箱型支护梁、高强锚索及高强锚杆来实现此阶段的“抗”。

让压型锚索箱梁支护系统,相对于槽钢、矿用工字钢锚索梁支护系统而言,具有以下优点:①支护强度高,相同截面积情况下,箱型支护梁截面惯

性矩明显大于其他型钢,相同刚度时所使用钢材大大减少,经济合理;②护表效果好,支护力通过面荷载向上部围岩中传递,更加均匀;③整体支护性能好,通过锚索让压环与锚索高破断力相匹配,共同变形,定量让压,可有效防止单一支护材料过早失稳。

2.3 各组合构件性能

该支护系统主要构件为箱型支护梁、锚索、锚索让压环、高强锚杆,附属构件主要包括钢带、托盘、金属网等。为对比分析各锚索梁支护性能,进行支护组合构件数值试验。各支护构件及工字钢、槽钢的性能参数列于表1~3中。

表1 锚杆、锚索、钢带及托盘参数表

Table 1 Parameters of bolt, anchor, metal band, and pallet

支护构件	型号	屈服强度 σ_s /MPa	极限强度 σ_b /MPa	弹性模量 E /GPa	延伸率 δ /%	横截面积 A /cm ²
锚索	$\phi 17.8$	1500	1860	195	5	2.49
	$\phi 22$	1500	1860	195	5	3.80
顶锚杆	$\phi 22$	500	700	200	20	3.80
帮锚杆	$\phi 20$	500	700	200	17	3.14
钢带	UD140/4	250	450	210		
托盘		235	376	206		

表2 钢梁参数表

Table 2 Parameters of steel beam

支护构件	型号	屈服强度 σ_s /MPa	极限强度 σ_b /MPa	弹性模量 E /GPa	横截面积 A /cm ²	惯性矩 I /cm ⁴
槽钢	[14a	235	376	206	18.5	53.2
工字钢	矿用 I12 [#]	235	376	206	39.7	178.2
箱型支护梁	II 12a	235	376	206	20.7	116.8
	II 12b	235	376	206	33.6	229.7
	II 12c	235	376	206	35.6	320.6

表3 让压环性能参数表

Table 3 Parameters of yielding link

支护构件	初级让压点 R_1 /kN	二级让压点 R_2 /kN	初次让压距离 D_1 /mm	二次让压距离 D_2 /mm
锚索让压环	200	300	25	25

单轴压缩试验结果(见表3、图4)表明,锚索让压环具有二阶让压特性,且让压点高、让压距离大、稳定性好,可与高刚高强的箱型支护梁及高强锚索相互配合共同发挥让压能力。

3 数值试验

利用数值模拟对让压型锚索箱梁支护系统各组合构件耦合性能进行试验研究。设计了13种不同托梁与锚索组合、不同锚索预紧力组合的数值试验对比方案,建立了构件性能利用率、构件耦合效率和

围岩控制效果 3 个评价指标, 并对数值计算结果进行分析。

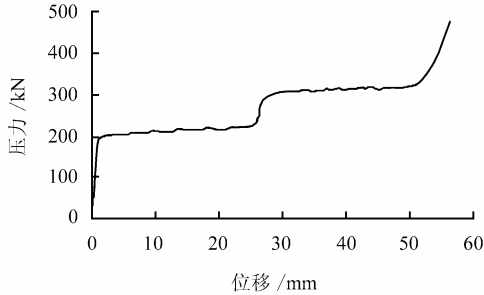


图 4 单轴压缩位移-压力试验曲线
Fig.4 Displacement-pressure curve of uniaxial compression test

3.1 耦合支护效果评价指标

为更加方便合理地进行各方案结果的比较分析, 提出 3 种指标对耦合支护效果进行统计分析, 分别为支护系统组合构件整体性能利用率、支护系统组合构件耦合效率和围岩控制效果。

支护系统组合构件整体性能利用率 η 是支护系统各构件发挥其效能的整体评判指标, 其值越大, 表示支护系统整体性能发挥越充分。同时构件整体性能利用率不应过大, 整体性能余量(等于 $100\%-\eta$)应有富余, 以保证足够的安全储备。

该指标通过各构件性能利用率与其相应权重值的乘积求和得出, 见式(1)。

$$\eta = \sum_{i=1}^n Q_i \omega_{Gi} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为构件整体性能利用率; Q_i 为某构件性能利用率; ω_i 为某构件(评价因素)对应权重值。

性能利用率 Q 是指构件实际受力变形状态与其极限承载状态的比值, 见式(2)。

$$Q = \frac{S_a}{S_l} \quad (2)$$

式中: S_a 为构件实际受力变形状态, 钢梁取其最大应力 $\sigma_{\max}$, 锚索、锚杆取其最大轴力, 分别记为 $F_{\max-c}$ 及 $F_{\max-b}$, 锚索让压环取其实际让压距离 D_a ; S_l 为构件极限承载状态, 钢梁取其钢材极限强度 σ_b , 锚索、锚杆取其能够承受的最大轴力, 分别记为 F_{l-c} 及 F_{l-b} , 锚索让压环取其极限让压距离 D_l 。

由于回采巷道服务年限较短。在煤巷支护中只要钢梁、锚杆、锚索等构件在掘进与回采期的服务年限内不破坏, 即不超过其极限承载强度, 则认为可满足支护的要求, 这样可充分利用材料性能, 在保证具有安全储备的情况下, 提高经济效益。因此,

本文在进行性能利用率时使用了构件的极限承载状态参数。

支护系统组合构件耦合效率 W 是反映支护系统各组合构件性能协调性与耦合效果的指标, 其值越大, 表示系统中各构件性能利用率保持在一个相对一致的水平, 协调性与耦合效果越好。为增强各方案对比性, 利用各构件整体性能利用率的标准差及式(3)将各方案构件的耦合效率进行归一化。

$$W = \frac{2}{\pi} \arctan \frac{1}{30S^2} \quad (3)$$

式中: S 为支护系统各组合构件性能利用率与其对应权重值乘积的标准差, 其计算公式见式(4)。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i \omega_i - \sum_{i=1}^n Q_i \omega_i / n)^2}{n}} \quad (4)$$

围岩控制效果主要是指支护系统对巷道围岩宏观的控制程度, 主要包括顶板沉降量和两帮移近量两个参量。该指标反映的是支护系统与围岩的耦合情况。

式(1)与式(4)中支护系统各组合构件(评价因素)对应权重值通过层次分析法确定^[17]。采用 1~9 标度方法构造判断矩阵 $P_{n \times n}$ 。对于让压型锚索箱梁支护系统整体性能利用率而言, 将箱型支护梁、锚索、高强锚杆、锚索让压环 4 个主要构件作为评价因素, 其层次分析结构如图 5 所示。

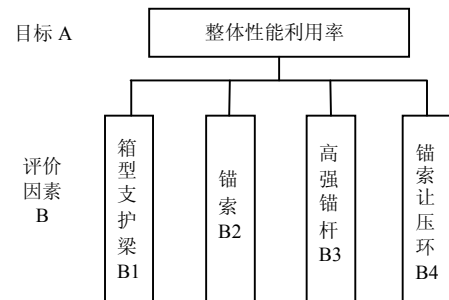


图 5 让压型锚索箱梁支护系统组合构件整体性能利用率层次分析结构图

Fig.5 Structure diagram of analytic hierarchy for whole performance utilization ratio of combined members of PRABB support system

根据大量工程实例、理论分析及数值试验研究^[2, 10, 12, 14, 16, 18], 借鉴前人层次分析法研究成果^[19-22], 参照 1~9 标度方法构造支护系统组合构件整体性能利用率评价因素 4 阶判断矩阵($n=4$):

$$P_{A-B} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 5 \\ 1/2 & 1 & 2 & 3 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

方案选择的支护构件。其中让压型锚索箱梁支护方案（方案 1~6）均配有锚索让压环。

表 5 计算方案

Table 5 Calculation schemes

方案	箱型支护梁			矿工钢	槽钢	锚索	
	II 12a	II 12b	II 12c	II 2 [#]	[14a	ϕ 17.8	ϕ 22
1	√						√
2	√					√	
3		√					√
4		√				√	
5			√				√
6			√			√	
7				√			√
8				√		√	
9					√		√
10					√	√	

根据现阶段煤巷支护材料使用现状，表 5 中每个计算方案选取相同的锚杆、钢带、托盘等其他支护材料，其中顶部采用 ϕ 22 的高强螺纹钢锚杆，帮部采用 ϕ 20 的高强螺纹钢锚杆，选用 UD140/4 型钢带、200 mm×200 mm×20 mm 锚索托盘及 150 mm×150 mm×14 mm 锚杆托盘。各支护材料参数详见 2.1 节。各计算方案施加相同的预紧力，预紧力值根据工程实例并考虑高强预紧力锚杆支护系统相关建议^[18]，锚索预紧力取为 150 kN，顶锚杆预紧力取为 70 kN，帮锚杆预紧力取为 50 kN。

3.3 试验结果对比分析

利用构件整体性能利用率、构件耦合效率和围岩控制效果 3 个指标对数值试验结果进行统计分析。

3.3.1 构件整体性能利用率分析

提取计算结果中各构件实际受力变形状态，利用式（2）计算构件性能利用率 Q ，然后利用式（1）求得构件整体性能利用率 η 其结果，如图 9 所示。

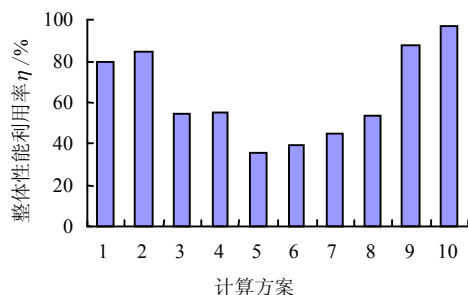


图 9 各方案组合构件整体性能利用率

Fig.9 Whole performance utilization ratio of combined members in each scheme

由图 9 可知：

（1）支护系统构件整体性能利用率最高的是 14 a 槽钢方案（方案 10），达到了 97.1%，最低的是 II 12c 型箱梁方案（方案 5）仅为 35.9%。考虑到顺槽巷道后期回采期间矿压影响，支护系统应预留一定的支护强度，所以对于该数值模型对应的地质情况来说，[14a 槽钢与 II 12a 箱梁对应的 4 种锚索梁方案整体强度过弱，整体性能余量太低（低于 20%），不应当采用。II 12b 型箱梁方案性能利用率居中（55%左右），又因其经济性较工字钢高，可作为优选方案。

（2）使用 ϕ 22 锚索的方案，与对应使用 ϕ 17.8 锚索的方案相比，整体利用率均偏低。

3.3.2 构件耦合效率分析

利用式（3）对各模拟方案的构件耦合效率 W 进行计算，结果如图 10 所示。

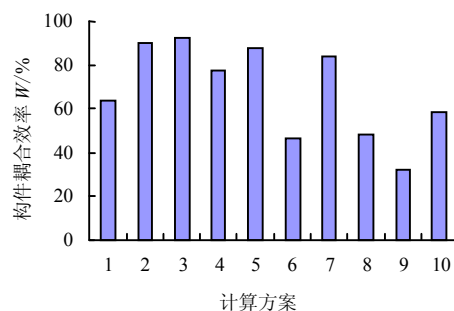


图 10 各方案组合构件耦合效率

Fig.10 Coupling efficiency of members in each scheme

由图 10 可知：

（1）耦合效果最好的 3 种计算方案分别为方案 3（II 12b+ ϕ 22 锚索）、方案 2（II 12a+ ϕ 17.8 锚索）和方案 5（II 12c+ ϕ 22 锚索），耦合效果排在最后 3 位的分别为方案 8（II 12[#]+ ϕ 17.8 锚索）、方案 6（II 12c+ ϕ 17.8 锚索）和方案 9（[14a+ ϕ 22 锚索）。

（2）锚索型号对支护系统耦合效率具有较为显著的影响。强钢梁配弱锚索或弱钢梁配强锚索均可能导致支护系统耦合效率低。

3.3.3 围岩控制效果分析

数值试验各方案的巷道顶板沉降和两帮内移量如图 11 所示。

对比图 11 中各方案计算结果可知：

（1）让压型锚索箱梁支护系统各方案对巷道变形控制效果整体优于矿用工字钢和槽钢锚索梁支护系统相应方案，且经济效果明显。顶板沉降量由小到大的前 3 种计算方案分别是 5、6、3，均为让压型锚索箱梁支护系统。II 12b 和 II 12c 的箱梁横截面

积均小于 12[#]矿工钢,但其对应的锚索梁方案(方案 3、5、6)支护效果却明显好于工字钢锚索梁方案(计算方案 7、8)或与其相当(计算方案 4 与 7 效果相当)。II 12a 箱梁横截面积仅比[14a 槽钢大 12%,而其对应计算方案(计算方案 1、2)的顶板沉降量却比槽钢锚索梁方案(计算方案 9、10)减少约 30%。

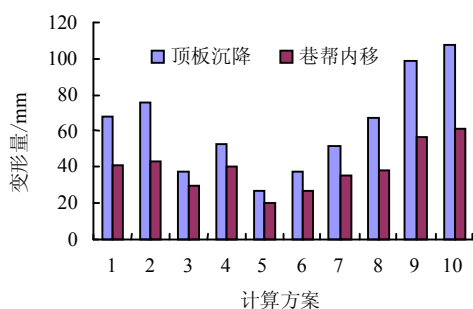


图 11 各方案巷道围岩变形量

Fig.11 Deformation of surrounding rock in roadway of each scheme

(2) 箱型支护梁的截面积越大,其对应方案对围岩的控制效果越好。II 12c 和 II 12b 型号箱型支护梁对应方案巷道顶板沉降量分别是 II 12a 型的 39.8%和 54.1%。

(3) 使用 $\phi 22$ 锚索的方案对巷道变形控制效果优于使用 $\phi 17.8$ 锚索的方案,在顶板沉降控制方面的优势比巷帮控制更加明显。

3.3.4 小结

综合分析以上数值试验结果可知:

(1) 方案 5 (II 12c+ $\phi 22$)、方案 7 (II 12[#]+ $\phi 22$)、方案 3 (II 12b+ $\phi 22$) 与方案 2 (II 12a+ $\phi 17.8$) 对应的支护系统均具有较高的耦合效率,能够分别针对所需支护强度由高到低的巷道围岩进行有效的耦合支护。但相对箱型支护梁而言,12[#]矿工钢经济性差,可用 II 12b 或 II 12c 箱型支护梁替代。

(2) 锚索型号对支护系统耦合效率具有较为显著的影响,在工程应用中应避免使用强钢梁配弱锚索或弱钢梁配强锚索的锚索梁支护方案。

(3) 方案 3 对应的让压型锚索梁支护系统 (II 12b+ $\phi 22$ 锚索) 在埋深 1 000 m 左右煤巷支护中使用具有适中的强度(掘巷期间构件整体性能利用率为 54.2%)、较高的耦合效率(效率值为 90%)。

3.4 预紧力因素影响分析

3.4.1 对比方案设计

参考 3.3.2 节结论,对方案 5 (II 12c+ $\phi 22$)、方案 3 (II 12b+ $\phi 22$) 和方案 2 (II 12a+ $\phi 17.8$) 3

种耦合效率较高的锚索梁方案中的预紧力影响因素进行分析。增加表 6 所示的 3 种计算方案 (11、12、13),将锚索预紧力由原来的 150 kN 提高到 200 kN,顶锚杆预紧力由原来的 70 kN 提高到 100 kN,分别与 3.2 节计算方案 2、3、5 进行对比分析。

表 6 计算方案

Table 6 Calculation schemes

序号	箱型支护梁			锚索		锚索	顶锚杆
	II 12a	II 12b	II 12c	$\phi 17.8$	$\phi 22$	预紧力 200 kN	预紧力 100 kN
11	√			√		√	√
12		√			√	√	√
13			√		√	√	√

3.4.2 计算结果分析

对计算结果进行统计分析,将顶板沉降量和构件整体性能利用率绘制于图 12。

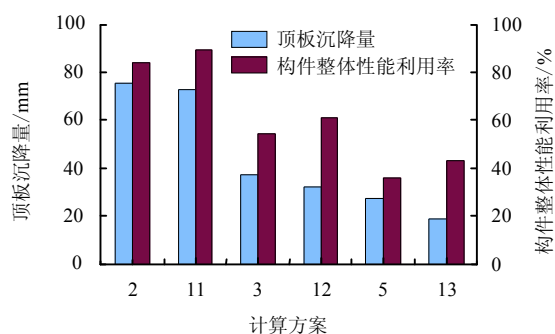


图 12 预紧力因素影响对比方案结果

Fig.12 Results of contrast calculation schemes for prestress force impact analysis

由图 12 可以看出,当支护系统预紧力提高后,构件整体性能利用率增大,围岩顶板沉降量减小。方案 13 与方案 5 的对比最为明显,说明 II 12c+ $\phi 22$ 锚索梁方案施加较高的预紧力后,充分发挥了 II 12c 箱型支护梁的高刚、高强特性,增大了构件耦合效率。因此,在锚索梁支护系统中应尽量增大锚索、锚杆的预紧力,尤其是在钢梁刚度和强度较高的系统中,这样才能充分发挥各组合构件性能,起到更好与围岩共同作用的效果。

4 现场试验

4.1 工程概况

赵楼煤矿 3 煤埋深为 990 m,地应力高,最大主应力为水平应力,应力情况已在 3.2.1 节介绍。3 煤煤层厚度 5~8.5 m,平均煤厚 7.8 m,煤层结构复杂。煤层普氏系数 f 为 0.8~2.3,平均为 1.6。试

验段所在 3302 运顺直接顶为粉砂岩, 部分区段含有泥质与砂质泥岩互层, 煤岩交界面粘结力低, 离层明显。地层条件极为复杂, 存在多处断层, 巷道沿煤层底板掘进, 矿压显现大。

4.2 支护方案设计及实施

对于某具体工程条件, 上述数值试验模拟结果显示, 选择不同支护强度的支护构件进行组合, 可得到不同支护构件承载能力与围岩变形的匹配的情况。根据具体工程对支护构件承载能力和巷道围岩变形的要求, 选择最为合适的支护构件组合情况进行方案设计。结合上述 3302 运顺具体地质情况及施工要求, 选择 II 12b 型箱型支护梁, 选用直径为 22 mm 锚索, 预紧力为 150 kN, 锚索让压环选用表 3 所列型号, 顶锚杆直径为 22 mm, 预紧力为 70 kN, 帮锚杆直径为 20 mm, 预紧力为 50 kN。方案布置如图 8 所示。

通过有限差分软件 FLAC^{3D} 对耦合支护效果进行有地应力存在条件下的支护效果模拟验证, 结果表明, 采用该支护方案, 巷道围岩变形量较小, 顶板下沉量最大为 56 mm, 两帮移近量最大为 72 mm, 围岩得到较好的控制。模拟结果如图 13 所示。

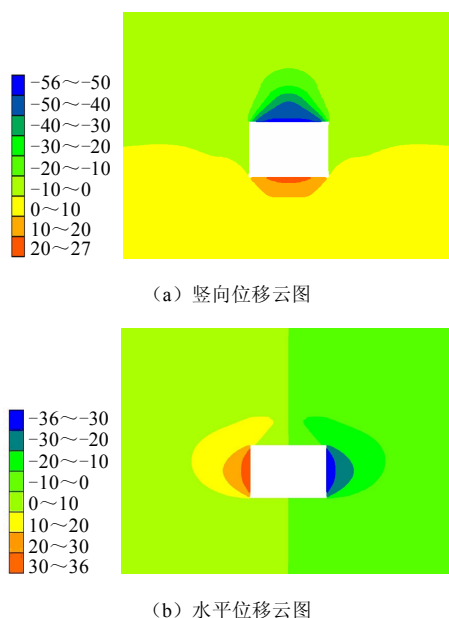


图 13 选用方案数值模拟结果 (单位: mm)

Fig.13 Numerical simulation results of selected scheme (unit: mm)

4.3 监测设备制作及布设方案

4.3.1 测力箱梁的制作

为分析验证运顺中组合构件的受力情况, 设计制作了测力箱梁, 将箱型支护梁的受力与巷道围岩变形、锚索和锚杆受力等监测数据相结合, 综合评

价组合构件耦合性能。

测力箱梁通过应变测量原理进行受力监测。使用 BXL120-2AA 与 BXL120-3CA 两种型号应变片, 采用半桥电路接法。

每根测力箱梁上设有 3 个锚索孔, 翼缘部分每个锚索孔两侧 150 mm 处分别粘贴 120-3CA 型应变片, 在两个相连锚索孔的中间位置各粘贴一个 120-2AA 型应变片, 从顺槽左帮到右帮, 编号依次为 Y1~Y8; 腹板部分在每个锚索孔及相连锚索孔中间对应位置分别粘贴 120-2AA 型应变片, 编号依次为 B1~B5, 应变片具体布置如图 14 所示。

由于井下的特殊作业环境, 测力箱梁在打磨、贴片及涂胶等制作过程中重点注意了防损坏与防潮, 加工制作过程如图 15 所示。

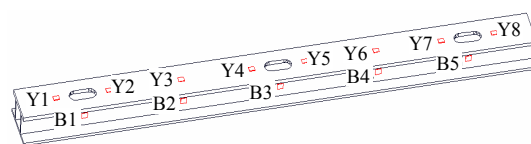


图 14 贴片粘贴位置示意图

Fig.14 Diagram of patch position



图 15 测力箱梁制作过程

Fig.15 Manufacturing process of force measuring anchor box beams

4.3.2 监测设备布设

在试验巷道内布置测站, 每个测站均包括巷道表面位移、锚杆、锚索和箱梁受力监测。测力箱梁上每个锚索孔处安设锚索测力计, 测力箱梁邻近钢带按对称原则布置 3 个锚杆测力计、测力锚杆、顶板离层仪和红外多点位移计安设在顶板中间位置。各监测设备布置如图 16、17 所示。

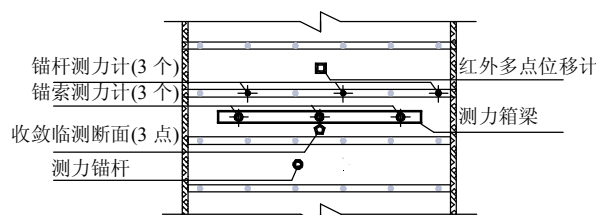


图 16 监测设备局部布置图

Fig.16 Layout diagram of monitoring facilities

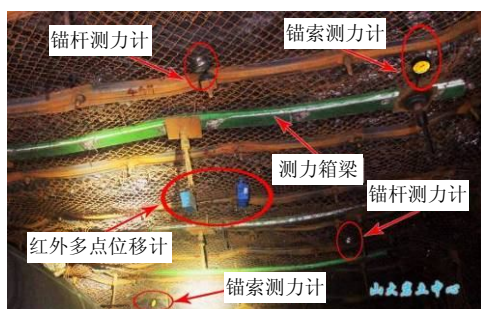


图 17 现场局部布置图

Fig.17 Layout diagram of monitoring facilities in field test

图 18~21 为现场支护构件受力及巷道表面位移监测曲线。

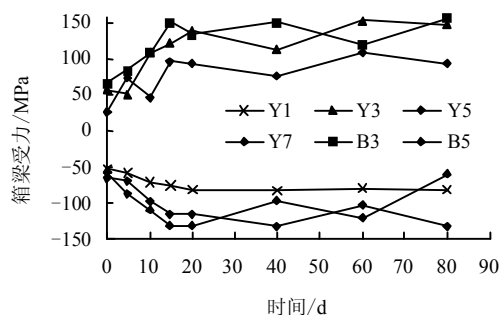


图 18 测力箱梁受力监测曲线

Fig.18 Load monitoring curves of box beam

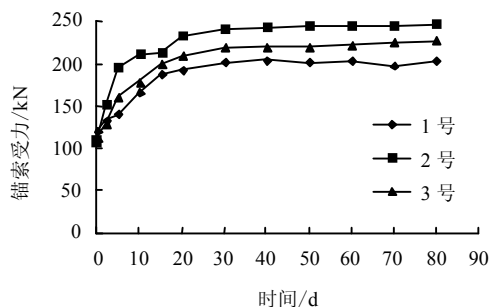


图 19 锚索受力监测曲线

Fig.19 Load curves of anchors

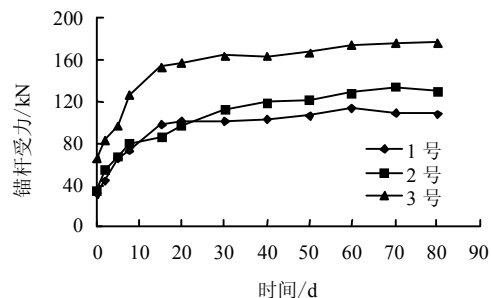


图 20 锚杆受力监测曲线

Fig.20 Load curves of bolts

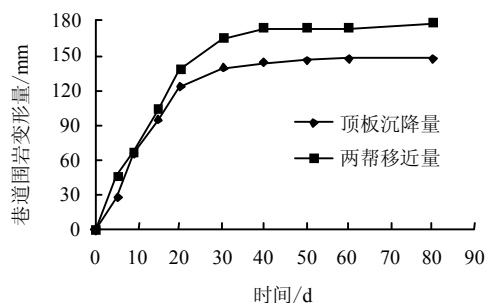


图 21 巷道表面位移监测曲线

Fig.21 Monitoring curves of roadway surface deformation

综合分析各构件受力及巷道围岩变形监测结果, 可以得出以下结论:

(1) 施加预紧力后, 箱梁、锚索等受力构件进入工作状态(发挥承载作用), 巷道掘进初期, 受力和变形均处于较小状态, 增速很大; 随巷道掘进, 各构件受力明显增加, 增速明显减弱。当巷道掘进 15~20 d 左右时, 各构件受力及巷道表面位移基本趋于稳定。

(2) 箱梁受预紧载荷与围岩反力的双重作用, 翼缘部分锚索孔两侧应变片处于受压状态, 相邻锚索孔中间位置(图 14 中 Y3 测点)的应变片处于受拉状态; 腹板部分应变片均处于受拉状态, 锚索孔位置的箱梁受力整体大于其他部分。受力稳定后, 箱梁翼缘最大应力值为 185 MPa, 腹板受力最大应力值为 204 MPa, 差别不大, 所有测点应力值一般集中在 100~200 MPa 之间, 说明箱梁结构受力合理协调, 没有造成明显的应力集中现象。

(3) 巷道趋于稳定后, 各构件均较充分发挥了性能, 箱梁、锚索、锚杆及锚索让压环性能利用率分别为 54.26%、35.14%、69.23%、75.00%, 支护系统的整体性能利用率为 54.51%, 为后期工作面回采预留了足够的支承强度和安全储备。构件耦合效率达到 75.61%, 系统各构件达到了同步承载的效果。试验段所在 267#钢带处顶板沉降量为 148 mm, 两帮移近量为 180 mm。从整体控制效果来说, 巷道围岩变形量较小, 巷道的稳定性得到控制。采用该组合形式的让压型锚索箱梁支护系统能够较好地控制该类巷道的围岩变形。

5 结 论

(1) 最新研发的高强让压型锚索箱梁支护系统, 以“先控后让再抗”支护理念为指导, 具有定量让压、构件耦合效率高、巷道围岩控制效果显著且经济效益明显的特点。

(2)提出了支护系统组合构件整体性能利用率、构件耦合效率和围岩控制效果 3 个指标, 并利用层次分析法确定了支护系统各构件权重值。

(3) 通过基于构件整体性能利用率、构件耦合效率和围岩控制效果指标设计的 13 种数值对比试验, 整理分析可知: 锚索方案 II 12c+ ϕ 22、II 12b+ ϕ 22 和 II 12a+ ϕ 17.8 对应的支护系统均具有较高的耦合效率, 能够分别针对所需支护强度由高到低的巷道围岩进行有效的耦合支护, 且经济合理; 锚索型号对支护系统耦合效率具有较为显著的影响, 在工程应用中应避免使用强钢梁配弱锚索或弱钢梁配强锚索的锚索梁支护方案; 提高预紧力有助于提高构件整体利用率和耦合效率, 对围岩变形控制有明显作用。

(4) 选择 II 12b+ ϕ 22 方案对应的让压型锚索箱梁支护系统, 在赵楼煤矿 3302 运顺进行了现场试验。巷道及支护构件监测表明: 箱梁受力合理协调, 掘巷期间支护系统组合构件的整体性能利用率为适中, 构件耦合效率较高。系统各组合构件达到了同步承载的效果, 较好地控制了巷道围岩变形, 并为后期工作面回采预留了足够的支承强度和安全储备。

(5) 锚索梁支护系统组合构件耦合支护研究表明, 支护系统的各构件强度、刚度的耦合能够充分发挥组合构件效能, 提高围岩自承能力, 有效控制巷道围岩变形。针对所需支护强度由高到低的不同地质条件, 选择耦合效率较高的不同组合方案, 并应考虑现场锚索预紧力损失, 对锚索施加较高的预紧力。

参 考 文 献

- [1] 何满潮, 齐干, 程骋, 等. 深部复合顶板煤巷变形破坏机制及耦合支护设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 987—993.
HE Man-chao, QI Gan, CHENG Pin, et al. Deformation and damage mechanisms and coupling support design in deep coal roadway with compound roof[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(5): 987—993.
- [2] 康红普, 吴拥政, 李建波. 锚杆支护组合构件的力学性能与支护效果分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1057—1065.
KANG Hong-pu, WU Yong-zheng, LI Jian-bo. Analysis of mechanical performances and supporting function of combination components for rock bolting[J]. **Journal of China Coal Society**, 2010, 35(7): 1057—1065.
- [3] 韩建胜, 王阁, 连传杰. 高水平应力条件下锚杆锚索耦合让压支护技术试验研究[J]. 煤炭技术, 2009, 28(12): 161—164.
HAN Jian-sheng, WANG Ge, LIAN Chuan-jie. Experimental study of bolt and anchorage cable's coupling yieldable support technology under high horizontal stress[J]. **Coal Technology**, 2009, 28(12): 161—164.
- [4] 齐干, 李占金, 唐强达, 等. 深部大断面软岩巷道变形力学机制及耦合支护设计[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 455—459.
QI Gan, LI Zhan-jin, TANG Qiang-da, et al. Deformation mechanical mechanism and coupling support design for deep large-section-soft-rock roadway[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2009, 26(4): 455—459.
- [5] 康红普, 王金华, 林健. 高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(12): 1233—1238.
KANG Hong-pu, WANG Jin-hua, LIN Jian. High pretensioned stress and intensive bolting system and its application in deep roadways[J]. **Journal of China Coal Society**, 2007, 32(12): 1233—1238.
- [6] 柏建彪, 王襄禹, 姚喆. 高应力软岩巷道耦合支护研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(4): 421—425.
BAI Jian-biao, WANG Xiang-yu, YAO Zhe. Study of coupling support in soft rock roadway under high stress[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2007, 36(4): 421—425.
- [7] 孙晓明, 何满潮. 深部开采软岩巷道耦合支护数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(2): 166—169.
SUN Xiao-ming, HE Man-chao. Numerical simulation research on coupling support theory of roadway within soft rock at depth[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2005, 34(2): 166—169.
- [8] 陈炎光, 陆士良. 中国煤矿巷道围岩控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.
- [9] 闫振东. 大断面煤巷支护技术试验研究及新型锚杆机研发应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
- [10] 华心祝, 赵少华, 朱昊, 等. 沿空留巷综合支护技术研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2225—2228.
HUA Xin-zhu, ZHAO Shao-hua, ZHU Hao, et al. Research on combined support technique of gob-side entry retaining[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(12): 2225—2228.

- [11] 肖同强, 柏建彪, 王襄禹, 等. 深部大断面厚顶煤巷道围岩稳定原理及控制[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1874—1880.
- XIAO Tong-qiang, BAI Jian-biao, WANG Xiang-yu, et al. Stability principle and control of surrounding rock in deep coal roadway with large section and thick top-coal[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(6): 1874—1880.
- [12] 刘波, 李先炜, 陶龙光. 锚拉支架中锚杆横向效应分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 36—39.
- LIU Bo, LI Xian-wei, TAO Long-guang. Analysis of lateral behavior of bolts in roof truss system[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(4): 36—39.
- [13] LIU B, YUE Z Q, THAM L G. Analytical design method for a truss-bolt system for reinforcement of fractured coal mine roofs-illustrated with a case study[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2005, 42(2): 195—218.
- [14] 康红普, 王金华. 煤巷锚杆支护理论与成套技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007.
- [15] 薛顺勋, 宋广太, 库明欣. 煤巷锚杆支护施工指南[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999.
- [16] 张良海, 原明星. 复合顶板巷道预应力锚杆锚索桁架支护技术[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(11): 18—20.
- ZHANG Liang-hai, YUAN Ming-xing. Prestressed bolt anchortruss support technology in composite roof roadway[J]. **Coal Science and Technology**, 2009, 37(11): 18—20.
- [17] 许树伯. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津出版社, 1988.
- [18] 张镇, 康红普, 王金华. 煤巷锚杆-锚索支护的预应力协调作用分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 881—886.
- ZHANG Zhen, KANG Hong-pu, WANG Jin-hua. Pre-tensioned stress coordination function analysis of bolt-cable anchor support in coal roadway[J]. **Journal of China Coal Society**, 2010, 35(6): 881—886.
- [19] 张召千. 大断面煤巷围岩稳定性控制及动态评价体系研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2009.
- [20] 熊仲明, 冯成帅. 大跨钢结构安全性模糊综合评估方法的应用研究[J]. 工程力学, 2011, 28(4): 128—133.
- XIONG Zhong-ming, FENG Cheng-shuai. Application study on the method for fuzzy comprehensive evaluation of large-span steel structure safety[J]. **Engineering Mechanics**, 2011, 28(4): 128—133.
- [21] 李相国. 基于改进的层次分析法的深基坑支护方案优选[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [22] 任国辉. 软岩地下工程支护方案优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.

水利建设与管理法规文件汇编(1-4 册)

著者: 水利部建设与管理司 水利部水利建设与管理总站, 大 32 开本, 2888 页, 2426 千字, 平装, 定价: 198 元, 出版单位: 中国水利水电出版社, 版次: 第 1 版第 1 次印刷, 出版时间: 2012 年 3 月, 标准书号: ISBN 978—7—5084—9014—4, 中图分类号: D922.669 TV。

内容提要: 本书汇总编辑了现行水利建设与管理法规文件 282 篇, 分为法律、行政法规和法规性文件、国务院部门规章及规范性文件、附篇等四个部分。附录收录了现行水利技术标准目录(截至 2008 年底前颁布实施), 每部分文件以发布时间先后进行编排。

读者对象: 本书既是水利建设与管理领域干部职工的工具书, 也是水利勘测、设计、施工、监理、检测、管理、科研等单位和大中专院校参考用书。

土木工程结构高级仿真与设计方法

著者: 计静 刘文洋 徐松芝, 16 开本, 256 页, 313 千字, 平装, 定价: 32 元, 出版单位: 中国水利水电出版社, 版次: 第 1 版第 1 次印刷, 出版时间: 2012 年 8 月, 标准书号: ISBN 978—7—5170—0224—6, 中图分类号: TU318。

内容提要: 本书基于 ANSYS 有限元软件对典型的工程结构开展了仿真分析, 向读者系统全面地展示了 ANSYS 结构分析方法与结果, 提出实际工程的设计建议。对从事科研和工程方面的读者有很大的借鉴。全书共 22 章。主要内容涉及传统的钢结构、钢筋混凝土、大跨空间结构、组合结构、特种结构和海洋结构。

读者对象: 本书适合作为土木、力学等相关专业研究生或高年级的大学本科学习结构数值分析的参考书。尤其对工程技术人员开展结构仿真具有一定的参考价值。