

文章编号:1672-3961(2009)04-0087-05

# 深井综放沿空掘巷合理支护形式研究

靖洪文<sup>1,2</sup>, 许国安<sup>1,2</sup>, 曲天智<sup>3</sup>, 张春雨<sup>1,2</sup>

(1. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008;

2. 中国矿业大学建筑工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 兖州煤业股份公司, 山东 邹城 253710)

**摘要:**为了给深井综放沿空掘巷的支护选型和参数设计提供指导与依据,首先从结构力学的角度对目前综放沿空掘巷常用的工字钢棚和锚网梁(索)2种支护形式的作用机理进行了分析,然后通过实验室物理模拟试验研究了上述2种支护形式的作用效果,并且从关键承载层与次生承载层的相互关系分析了锚索的支护作用.结果显示,锚网梁(索)支护能很好地适应深井综放沿空掘巷的变形特点与维护要求,是理想的支护形式;顶板锚索的作用主要是将锚杆锚固形成的次生承载层与深部关键承载层连接起来,大大增强围岩稳定性.

**关键词:**深井;沿空掘巷;支护形式;结构分析;物理模拟

**中图分类号:**TD3      **文献标志码:**A

## Research on the suitable support form of deep gob-side entry in fully mechanized top coal caving mining

JING Hong-wen<sup>1,2</sup>, XU Guo-an<sup>1,2</sup>, QU Tian-zhi<sup>3</sup>, ZHANG Chun-yu<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, Xuzhou 221008, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China;

3. Yanzhou Coal Co. Ltd., Zoucheng 253710, China)

**Abstract:** To provide guidance and basis for the selection of support form and the design of support parameters of deep gob-side entry, the action mechanisms of two support forms, i. e. I-steel set support and bolt support with wire mesh, bar and cable were analyzed from the aspect of structural mechanics, and then their supporting effects were investigated by physical simulation in the laboratory. The supporting principle of cable was analyzed based on the interrelation between the key bearing layer and the secondary one. The results showed that the bolt support with wire mesh, bar and cable was the perfect support form because it can well meet the requirement of deep gob-side entry for support, and the primary role of the roof cable is to link the key bearing layer and the secondary one, which can greatly increase the stability of surrounding rocks.

**Key words:** deep mine; gob-side entry; support form; structure analysis; physical simulation

## 0 引言

综放顶煤开采技术给煤炭生产带来了巨大的技术经济效益,已成为煤矿高产高效的重要技术手段.但随着窄煤柱护巷技术的推广和采深的加大,综放沿空掘巷的支护技术已成为制约综合机械化放顶

煤开采技术发展的关键问题之一.

目前综放沿空掘巷常采用工字钢棚和锚网梁(索)2种支护形式.它们对浅部矿井的综放沿空掘巷都能起到较好的维护效果.当进入深部开采后,由于工字钢棚结构稳定性差,实际支护阻力小,受采动影响后,巷道变形量大、维护困难.锚网梁(索)支护深入围岩内部对其进行主动加固,能充分调动围岩

收稿日期:2009-05-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50674083,50490273);十一五科技支撑计划资助项目(2008BAB36B07)

作者简介:靖洪文(1963-),男,山东聊城人,教授,博士生导师,博士后,从事岩土工程方面的研究工作.E-mail: hwjing@cumt.edu.cn

自身的承载能力,而且支护体与围岩相互作用形成有机承载整体,结构稳定性明显高于工字钢棚,对深井综放沿空掘巷的维护效果较好.然而,由于对锚网梁(索)支护的作用原理缺乏深入了解,现场进行支护设计时,盲目性较大.

因此,为了给合理选择支护形式和支护参数的优化设计提供指导与依据,本文首先从结构力学的角度对工字钢棚和锚网梁(索)支护的作用机理进行分析,然后通过实验室物理模拟试验研究了以上2种支护形式的支护效果,并且从关键承载层与次生承载层相互关系分析了锚索的支护作用,最后得出了一些有意义的结论.

## 1 不同支护形式作用机理结构分析

从巷道围岩空间状态而言,巷道是由顶板、底板和两帮组成的一个复合结构体,结构的各个部分在矿山压力作用下的受力状态不同,其围岩性质也存在着很大的差异,因而巷道顶、底、帮的稳定状态往往有明显的结构特征<sup>[1]</sup>.具有结构特性的力学体系可以用梁、柱、板等力学结构单元来描述<sup>[2]</sup>,它的形成及运动与围岩性质、支护体特性、巷道维护方式等因素有关.

### 1.1 工字钢支护的结构分析

工字钢支架的顶梁支承在两根柱腿上,顶梁可简化为简支梁,柱腿可简化为悬臂梁,如图1所示.

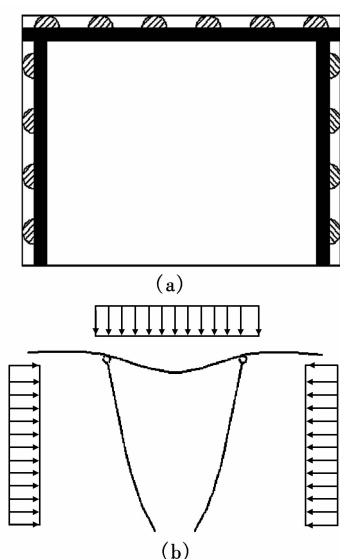


图1 工字钢支架结构分析简图

(a)工字钢支架示意图;(b)工字钢梁柱结构受力变形图

Fig.1 Sketch of I-steel set for structural analysis

(a) Sketch of I-steel set; (b) Deformation of I-steel set structure

工字钢支架属于被动的刚性支护,存在被动承载和结构稳定性差等缺点.工字钢支架受到来自顶

板和两帮的荷载作用,一方面由于巷道底板没有加固,底板在水平应力的挤压作用下出现严重底臃,底角随之发生内移并带动工字钢柱腿转动和倾斜;当柱腿倾斜到一定程度时,它将失去对顶梁的支撑作用,导致支架倒塌和巷道的垮落失稳.另一方面工字钢顶梁在垂直应力作用下,在与柱腿结合的部位应力集中较为严重并形成较大的剪力和弯矩,在顶梁的中部形成较大的弯矩和挠度,这些薄弱部位很容易发生断裂而失稳,从而失去对顶板的支撑作用并造成顶板的离层和冒落,最终导致“支架—围岩”系统完全失稳.因而,工字钢支架不能满足深井综放沿空掘巷对支护的要求.

### 1.2 锚网梁(索)支护的结构分析

在锚网梁整体支护的作用下两帮强度得到加强,顶角倾斜锚杆以向上的分力对顶板产生支撑作用,并通过锚固端加强岩梁的2个支撑点,把巷道顶板岩层的部分荷载转嫁到两帮煤体上,同时使顶板与煤帮有机的铰接在一起,增加了顶板岩梁的抗剪能力.与此同时,在底角锚杆的作用下,帮与底板也铰接在一起,强化对底板的支护,增加了其强度和刚度,因此可以把底板简化为一根梁,形成如图2所示的结构体系.

这种结构体系在空间结构力学上是不稳定的,但在岩石地下结构工程中,由于锚杆深入围岩内部主动加固围岩,锚杆与围岩相互作用并形成有机整体,共同发挥承载作用,从而使结构体系获得良好的稳定性.锚网梁(索)支护体系呈整体可缩柔性工作状态,当围岩对支护的作用力大于相应的支护反力时,支护体不会像工字钢支架一样失去大部分承载力并发生严重变形破坏,而是在一定工作阻力下进行可缩让压的同时对围岩提供维护.

锚网梁支护可以通过调整煤帮的应力状态来改善煤体的承载性能和破坏形态<sup>[3-4]</sup>.针对角部易出现的应力集中显现,安设了顶底角倾斜锚杆,倾斜锚杆可将作用于围岩的水平 and 垂直应力分解为对锚杆的压应力和剪切力,提高围岩的承载能力,充分发挥围岩整体锚固的效应,可达到有效控制底臃,减小两帮位移和顶板下沉量的作用.

锚杆支护的实质就是锚杆和锚固区域的岩体相互作用而组成锚固体,形成统一的承载结构,相对于深部围岩的关键承载结构而言为围岩次生承载结构<sup>[5-6]</sup>.巷道围岩锚固体强度提高以后,可以减少巷道周围破碎区、塑性区的范围和巷道的周边位移,从而有利于巷道围岩的稳定.

然而,深井综放沿空掘巷与浅井综放沿空掘巷

的区别在于,浅井巷道锚网梁支护的次生承载层与深部关键承载层相互邻接,而深井巷道的次生承载层与关键承载层相互脱离(图 2c). 锚索将锚杆支护形成的次生承载层与深部关键承载层联系起来,形成新的厚层承载体,进一步调动深部围岩的承载能

力,从而大大提高围岩稳定性. 因此,在深井综放沿空掘巷的支护中,应增设一定规格和数量的锚索来防止锚杆锚固范围以外的顶板离层,加强承载结构的完整性和稳定性.

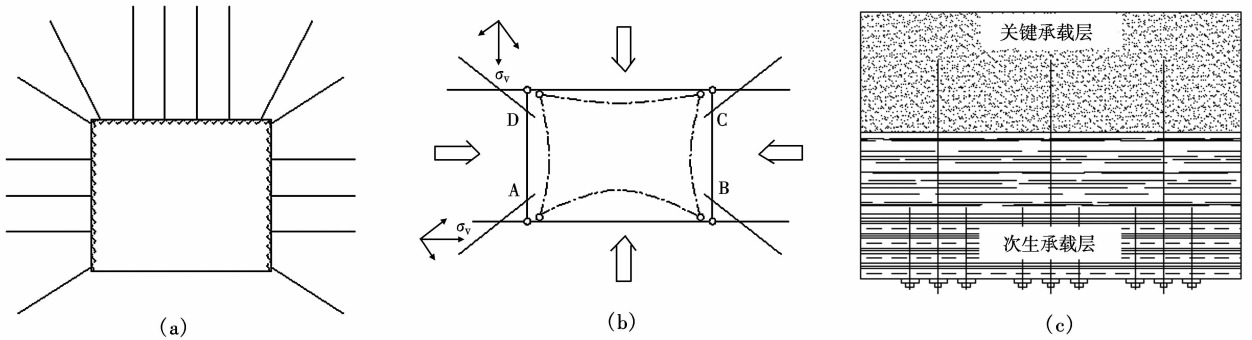


图2 锚网梁索支护形式分析简图

(a) 锚网梁支护示意图; (b) 锚网梁支护形式受力变形图; (c) 锚索支护作用原理图

Fig.2 Sketch of bolting support with bar and wire mesh and cable for structural analysis

(a) Sketch of bolting support with wire mesh and bar; (b) Deformation of a roadway supported with bolt, wire mesh and bar;

(c) Schematic diagram of cable supporting

## 2 合理支护形式的物理模拟研究

### 2.1 模拟材料

以砂子与石蜡胶结的相似材料与通常选用的砂子、水泥、石膏胶结的相似材料相比,具有模型制作

试验周期短、材料的力学性能稳定(不受湿度变化的影响)、材料可以复用等优点. 而且,该材料具有良好的弹塑性,更适合于模拟地下巷道的矿压显现特征. 因此,本试验采用砂与石蜡的混合物来模拟巷围岩及煤层,用云母片来模拟各岩层间的弱面. 根据工程围岩条件可得模型的岩性指标如表 1 所示.

表1 模型岩性参数

Table 1 Mechanical parameters of model

序号	岩性	厚度/mm	抗压强度 $\sigma_c$ /MPa	抗拉强度 $\sigma_t$ /MPa	弹性模量 $E$ /GPa	泊松比 $\nu$	容重 $\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )
1	砂岩	373	1.15	0.095	0.843	0.22	均取 1.6
2	泥岩	100	0.58	0.056	0.308	0.17	
3	煤	217	0.24	0.088	0.094	0.30	
4	泥岩	150	0.58	0.056	0.308	0.17	
5	砂岩	160	1.15	0.095	0.843	0.22	

根据砂和石蜡配比试验曲线(图 3)和模型围岩强度的要求,选用配比为 38:1 的材料来模拟煤层,用配比为 30:1 的材料来模拟泥岩,配比为 23:1 的材料来模拟砂岩.

### 2.2 工字钢支护作用分析

图 4 为采动前后巷道周边位移演化曲线<sup>[7]</sup>. 可以看出:①未受采动影响时,巷道周边位移量大小顺序为煤柱帮 > 顶板 > 实体煤帮. ②当采动支承压力系数为 1.2 时,煤柱帮表面位移急剧增加,从采动前的 7.4 mm 增加到 13.9 mm,顶板和实体煤帮分别增加 3.03 mm 和 2.63 mm. ③当采动支承压力系数为 1.6 时,两帮围岩由于十分破碎图像相关性分析停止,顶板下沉更为剧烈.

从图 5 可以看出:沿空掘巷开挖后,在工字钢支护情况下煤柱内产生“V”字剪切带,实体煤帮侧顶板角部沿 45°角破坏,顶板和两帮均有大的裂缝产生,破坏较严重的部位为顶板靠实体煤侧肩部和煤

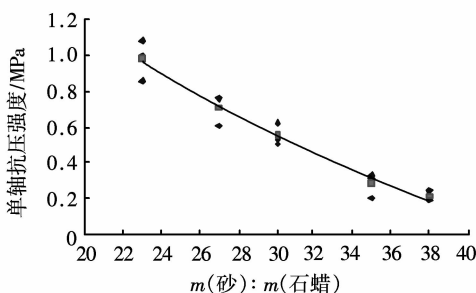


图3 相似材料配比曲线

Fig.3 Proportioning curve of similar materials

柱帮;未受采动时,煤柱帮变形较大,顶板下沉,但巷道整体维护情况良好;受采动后,随着支承压力的增大,巷道断面收缩严重.当支承压力系数达到1.6时,围岩十分破碎,巷道几乎被堵塞.

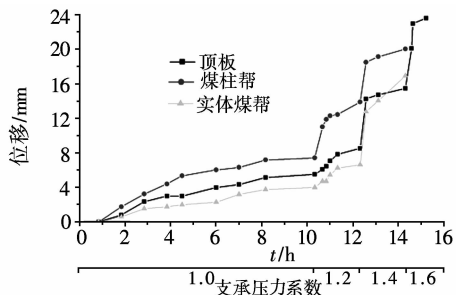


图4 工字钢支护巷道周边位移演化曲线

Fig.4 Displacement evolution of surrounding rocks supported with I-steel set

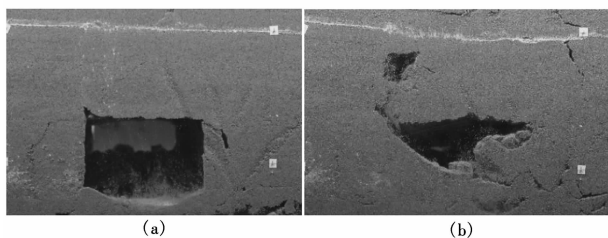


图5 工字钢支护巷道变形破坏情况

(a) 支护后采动前; (b) 支承压力系数1.6时

Fig.5 Damage process of a gob-side entry supported with I-steel set

(a) The gob-side entry before mining;

(b) The gob-side entry with support pressure factor as 1.6

### 2.3 锚网梁支护作用分析

图6为采动前后巷道位移演化曲线,从图中可以看出,围岩变形破坏具有如下特点:①未受采动影响时,巷道周边位移量顺序为实体煤帮>煤柱帮>顶板,随着采动支承压力系数增大至1.8时,煤柱帮变形超过实体煤帮.②采动影响前,巷道周边位移主要由锚杆锚固范围内(帮66.7mm、顶80mm)的碎胀变形引起,随着采动影响的加剧,深部煤体的碎胀变形占巷道周边位移的比重逐渐增大.

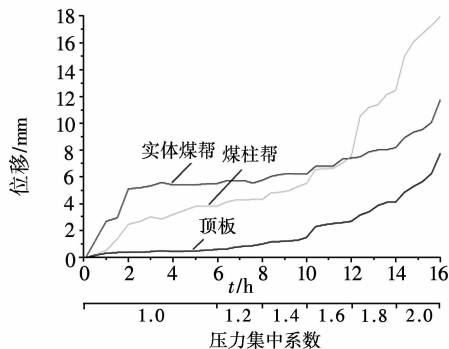


图6 锚网梁支护时巷道周边位移演化曲线

Fig.6 Displacement evolution of surrounding rocks supported with bolt, wire mesh and bar

由图7所示采动前后巷道变形破坏照片可以看出:受采动前,巷道整体维护情况良好,巷道两帮移近量略大于顶底板移近量,煤柱内产生“U”字剪切带,角部破坏较为严重,顶板未发生离层现象;受采动后,随着支承压力的逐步加大,巷道断面收缩严重,顶底板移近量大于两帮移近量,当支承压力系数达到2.0时,煤柱几乎完全破坏,顶板离层并向煤柱帮倾斜.在锚网支护作用下,围岩虽然呈现强烈的“鼓肚”现象,但没有坍塌.

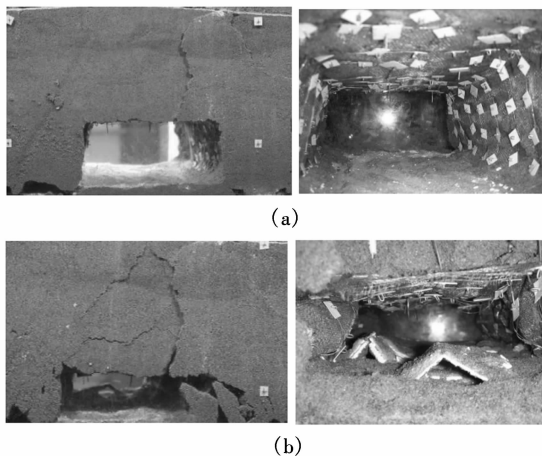


图7 锚网梁支护巷道维护情况

(a) 采动前; (b) 支承压力系数2.0时

Fig.7 Conditions of a gob-side entry supported with bolt, wire mesh and bar

(a) The gob-side entry before mining;

(b) The gob-side entry with support pressure factor as 2.0

综合物理模拟分析可以得出:

(1)深井综放沿空掘巷在采动前有明显的收敛变形,但工字钢棚支护和锚网梁支护均能保证巷道的稳定.受到本工作面回采影响后,巷道围岩变形远远大于采动影响前,前者可达到后者的5~10倍,由于工字钢支架不能主动承载且抗变形能力差,远不能适应深井综放沿空掘巷的围岩稳定控制要求.

(2)锚网梁支护能有效调动围岩承载能力,与被加固围岩共同协调变形,锚固体在大变形的情况下不会发生坍塌,具有良好的稳定性.然而,锚杆无法阻止其锚固范围外的深部围岩的离层,要确保深井综放沿空掘巷的使用安全,应在巷道顶板增设一定长度和数量的锚索.

### 2.4 锚索支护作用分析

为进一步研究锚索对深井综放沿空掘巷的维护作用,对锚网梁支护和锚网梁索支护进行了相似模拟对比试验.锚网梁支护和锚网梁索支护下巷道顶板和实体煤帮不同深度处的垂直应变(对应于一定的垂直应力)分布曲线如图8和图9所示.

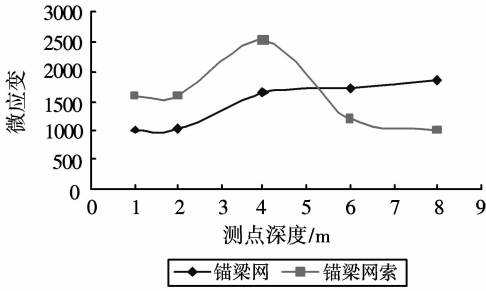


图8 采深800m顶板测线垂直应变分布

Fig.8 Distribution of vertical strains on a roof line normal to the roof strata of an 800 m deep entry

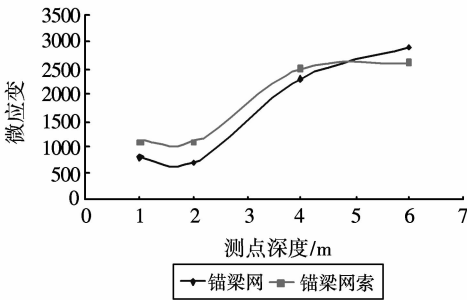


图9 采深800m实体煤帮测线的垂直应变分布

Fig.9 Distribution of vertical strains on a side line normal to the sidewall of an 800 m deep entry

从图8可以看出:在巷道顶板1~4m范围内,锚网梁支护的应力明显小于锚网梁索支护;在6~8m范围内,锚网梁索支护的应力小于锚网梁支护.说明通过锚索的张拉作用,使作用区外的应力向作用区内转移,作用区内形成三向应力较高的压缩承载拱,增强了岩体的稳定性,并能提高软弱结构面或滑移面上的抗剪强度;而锚索作用区外的应力相对较低,它将锚网梁索形成的高应力压缩带与深部围岩隔开,起到缓冲作用.

由图9可知:锚网梁索支护的实体煤帮应力分布较锚网梁支护平缓,前者的浅部围岩应力高于后者,而深部围岩应力小于后者.这说明锚网梁索支护下的实体煤帮浅部承载力高于锚网梁支护,应力分布较均匀,更有利于帮部的稳定.分析其原因是锚索大大提高了巷道顶板的强度和刚度,使顶板弯曲下沉量较锚网梁支护时大大减小,因而顶板作用于两帮的荷载较均匀,从而提高了两帮的稳定性,达到“控顶护帮”的作用.

### 3 结语

根据对工字钢支护和锚杆支护的结构力学分析,以及2种支护条件下深井综放沿空掘巷围岩变形破坏特征的相似材料模型试验研究,主要得出以下结论:

(1)工字钢支架属于被动的的外部支撑型刚性梁柱结构,存在被动承载和结构稳定性差等缺点,不能满足深井综放沿空掘巷的支护要求;锚网梁(索)支护属于主动的“外(部)撑内(部)加(固)”型柔性结构,能很好地适应深井综放沿空掘巷的变形特点与维护要求,是理想的支护形式.

(2)顶板锚索的作用主要包括3个方面:①通过将次生承载层与关键承载层联系起来,充分调动深部围岩的自承能力;②通过悬吊下部围岩和增加顶板的刚度来减小顶板下沉量并防止离层;③使两帮受力均匀来增强两帮的承载能力从而起到“控顶护帮”的作用.

### 参考文献:

[1] 王思敬,杨志法,刘竹华. 地下工程岩体稳定性分析[M]. 北京:科学出版社,1984.  
WANG Sijing, YANG Zhifa, LIU Zhuhua. Stability analysis of rock mass around underground engineering[M]. Beijing: Science Press, 1984.

[2] 伍永平,柴敬. 回采巷道内岩体结构与支护体相互作用分析[J]. 阜新矿业学院学报,1997,16(01):55-59.  
WU Yongping, CHAI Jing. Analysis of rock-support interaction in gateways[J]. Journal of Fuxin Mining Institute, 1997, 16 (01): 55-59.

[3] ZHOU X P. Triaxial compressive behavior of rock with mesoscopic heterogenous behavior: strain energy density factor approach [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2006, 45(1):46-63.

[4] YANG S Q, JIANG Y Z, XU W Y, et al. Experimental investigation on strength and failure behavior of pre-cracked marble under conventional triaxial compression[J]. International Journal of Solids and Structures,2008, 45(17): 4796-4819.

[5] 康红普. 巷道围岩的关键圈理论[J]. 力学与实践,1997, 19(1):34-36.  
KANG Hongpu. Theory of key circle in surrounding rock of roadways[J]. Mechanics and Practice, 1997, 19(1): 34-36.

[6] 康红普. 巷道围岩的承载圈分析[J]. 岩土力学,1996,17 (4):84-89.  
KANG Hongpu. Analysis of load bearing circle in surrounding rock of roadways[J]. Rock and Soil Mechanics, 1996, 17 (4): 84-89.

[7] 汪小东. 沿空动压巷道围岩变形破坏演化与稳定控制[D]. 徐州:中国矿业大学建筑工程学院,2008.  
WANG Xiaodong. Study on deformation failure and stabilization control of dynamic pressure roadway driven along next goaf [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.

(编辑:孙培芹)

