

采矿与井巷工程

# 大断面破碎巷道全空间桁架锚索协同支护研究

左建平<sup>1,2</sup>, 孙运江<sup>1</sup>, 王金涛<sup>1</sup>, 陈岩<sup>1</sup>, 姜广辉<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;  
2. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 针对深部大采高综放工作面回采巷道由于断面大、破碎、扩容、大变形等, 而导致常规支护极易发生不协调变形失稳的问题, 基于对潞安矿区大断面软弱破碎巷道围岩变形破坏机理的系统深入分析, 从三维空间支护协同承载与围岩协调变形角度, 提出了全空间预应力桁架锚索协同支护新技术, 阐明了全空间桁架锚索的支护结构、支护机理及其优越性。通过对全空间桁架锚索协同支护方案进行设计, 并采用 FLAC<sup>3D</sup> 对其支护效果进行数值模拟分析, 得到不同预紧力条件下全空间桁架锚索支护巷道顶板预应力场三维空间分布规律, 表明全空间桁架锚索支护能够形成三维封闭的承载结构。  
**关键词:** 大断面破碎巷道; 全空间桁架锚索; 协同支护; 预应力场三维分布

中图分类号: TD323 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2016)03-0001-06

## Study on full space truss and anchor coordinative support of mine large cross section broken roadway

Zuo Jianping<sup>1,2</sup>, Sun Yunjiang<sup>1</sup>, Wang Jintao<sup>1</sup>, Chen Yan<sup>1</sup>, Jiang Guanghui<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;  
2. State Key Lab of Coal Resources and Safety Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** According to a large cross section, broken, expansion, high deformation and others, the conventional support would easily cause uncoordinated deformation and stability lost in the high cutting fully-mechanized top coal caving mining face in a deep mine, based on a systematic deep analysis on the surrounding rock deformation failure mechanism of mine large cross section soft and broken roadway in Lu'an Mining Area, from a view of the 3D space support coordinative load and surrounding rock coordinative deformation, a coordinative support technology of full space pre-stress truss and anchor was provided. The paper stated support structure, support mechanism and advantages of full space truss and anchor. With design on coordinative support plan of full space truss and anchor, a FLAC<sup>3D</sup> was applied to numerical simulation analysis on support effect. The 3D space distribution law of roof pre-stress field in full space truss and anchor support roadway was obtained under different pretension conditions. The results showed that full space truss and anchor support could form a 3D closed loading structure.

**Key words:** mine large cross section broken roadway; full space truss and anchor; coordinative support; 3D distribution of pre-stress field

## 0 引 言

为满足大采高综合机械化放顶煤开采重型设备的运输需求, 大采高综放回采巷道断面较传统开采

巷道显著增大, 且随着开采深度的增加, 深部开采“三高一扰动”的复杂应力环境使得巷道多呈现出破碎、扩容和大变形等矿压显现特征<sup>[1-4]</sup>。常规支护形式极易发生不协调变形而失稳, 严重制约了大

收稿日期: 2015-10-21; 责任编辑: 杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.03.001

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374215, 11572343); 霍英东教育基金会第十四届高等院校青年教师基金应用课题资助项目(142018); 高等学校学科创新引智 111 计划资助项目(B14006); 北京市科委重大科技成果转化落地培育资助项目(Z151100002815004)

作者简介: 左建平(1978—), 男, 江西高安人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: zjp@cumtb.edu.cn

引用格式: 左建平, 孙运江, 王金涛, 等. 大断面破碎巷道全空间桁架锚索协同支护研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 1-6.

Zuo Jianping, Sun Yunjiang, Wang Jintao et al. Study on full space truss and anchor coordinative support of mine large cross section broken roadway[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 1-6.

采高工作面安全高产高效开采<sup>[5]</sup>。因此,开展大断面破碎煤巷围岩的稳定原理与控制研究具有重要意义。近年来,我国学者在大断面松软破碎煤巷围岩的控制方面进行了较为深入的研究,并取得了一定的研究成果。其中,何满潮等<sup>[6-7]</sup>根据现代大变形力学理论,提出耦合支护思想,发明了恒阻大变形锚杆、锚索并展开初步应用。康红普等<sup>[8-10]</sup>提出了高预应力、强力支护技术,强调锚杆、托盘和钢带等各部分精细化协作。刘泉声等<sup>[11]</sup>对巷道破碎软弱围岩支护方法探索,提出分步联合支护的设计理念和优化支护方案。于斌<sup>[12]</sup>研发了适用于大断面煤巷支护的高强度锚杆,并采用FLAC<sup>3D</sup>对不同锚杆支护参数下巷道围岩应力场分布进行模拟分析。文献[13-15]研发了新型连接锁紧器高预紧力(复合)桁架锚索支护,并建立了凹槽型桁架锚索力学模型。

目前,巷道围岩控制多选取巷道横断面作为研究对象,如桁架预应力锚索系统,主要从二维角度来研究围岩控制问题。笔者基于对潞安矿区大断面软弱破碎巷道围岩变形破坏机理的系统深入分析,从三维空间支护协同承载与围岩协调变形角度,提出了全空间预应力桁架锚索协同支护新技术,阐明了全空间桁架锚索支护结构、支护机理及其优越性。通过对全空间桁架锚索协同支护方案进行设计,并采用FLAC<sup>3D</sup>对其支护效果进行数值模拟分析,得到了不同预紧力条件下全空间桁架锚索支护巷道顶板预应力场三维空间分布规律,为该支护新技术的工程实践及推广奠定了基础。

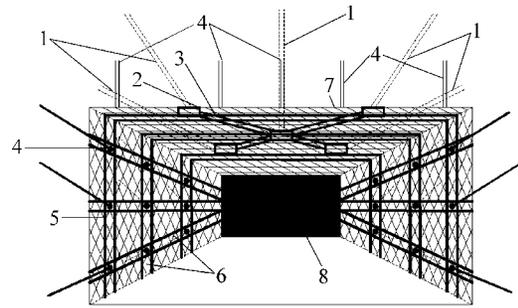
## 1 全空间桁架锚索协同控制系统分析

巷道受地质条件及周围岩体内部不均匀节理影响,局部很容易出现支护失效而造成冒顶、片帮等事故。因此,为实现支护系统协同承载与围岩协调变形,笔者提出了全空间预应力桁架锚索协同控制系统,下面对其支护结构与支护机理进行分析。

### 1.1 全空间桁架锚索协同支护结构

全空间桁架锚索协同支护结构如图1所示,其主要包括4个部分:顶板及时闭锁承载、两帮同时强控连顶、底角斜锚滞后注浆和全空间协同支护。

1) 顶板及时闭锁承载:顶板浅部通过合理的锚杆设计,形成“组合梁”小结构,顶板锚索采用“2-1-2”的布置方式,并且靠近两帮的锚索向两帮倾斜一定角度,使锚索锚固到两帮深部有效支撑的稳定顶部岩层中,这样顶锚索将“组合梁”小结构悬吊到深



1—锚索;2—托架;3—拉杆;4—锚杆;5—金属网;  
6—钢带;7—顶板;8—煤巷

图1 全空间桁架锚索协同支护结构

Fig. 1 Structure of full support truss and anchor coordinative supports

部稳定的岩层上,最后在锚索下端通过四通托架“十”字连接,并施加一定的预紧力,使顶板形成一个闭锁承载结构。

2) 两帮同时强控连顶:两帮是顶板支护结构的着力基础,巷帮控制是实现全空间桁架锚索协同承载以及巷道整体稳定的关键,该支护系统对巷帮采用“高强高预紧力锚杆+十字交叉钢带+金属网”加强支护,且巷帮肩角处钢带与顶板支护连接成一个整体。

3) 底角斜锚滞后注浆:在底角倾斜一定角度打设管缝式锚杆,并注浆加固底角,切断产生底鼓变形的塑性滑移线,削弱来自巷道两侧的挤压应力,减弱巷道底部应力集中程度,控制底角围岩塑性区的发展,有效控制底板鼓出变形。

4) 全空间协同支护:大断面破碎巷道顶板的及时支护对矿井安全生产至关重要,因此巷道掘出后及时进行顶板支护,使顶板形成自承载结构,为后面进行两帮的加强支护创造条件。两帮加强支护与顶板支护连接成一个整体,为顶板提供了更稳定的着力基础,然后在底角打设管缝式锚杆,切断塑性滑移线,并进行注浆加固。最终通过铺设锚网、架设钢带和安装四通托架,将“顶板及时闭锁承载、两帮同时强控连顶、底角斜锚滞后注浆”3个相对独立支护结构连接成一套整体承载的空间预应力桁架锚索支护体系。该控制系统内顶板、两帮以及底角支护相互作用,协同承载、变形,实现对大断面松软破碎巷道围岩变形的有效控制。

### 1.2 全空间桁架锚索协同支护机理

全空间桁架锚索协同支护技术是从三维空间角

度对巷道顶板、两帮以及底角支护进行系统耦合设计,使得支护系统内载荷协调分配,即使出现局部支护失效,其承担载荷也可以均匀协调转移到整个支护系统其他锚杆(索)上,防止巷道围岩出现局部失稳,从而实现大断面破碎巷道围岩整体协调控制的目的。该控制系统是对顶板钢绞线施加较高预紧力,并采用专用拉杆使钢绞线拉紧,给顶板岩体提供水平横向、水平轴向以及竖直方向预应力,在巷道顶板形成一个三维受压的压缩带,如图2所示。此外,两帮肩角深部岩体是顶板承载结构的着力基础,加强两帮煤体控制,既有利于实现自身稳定性控制,也有利于控制巷道围岩整体的变形破坏。

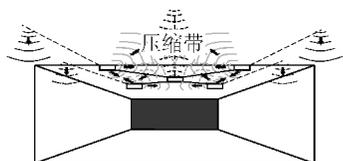


图2 全空间桁架锚索协同支护原理

Fig.2 Principle of full space truss and anchor coordinative support

从俯视图角度看,全空间桁架锚索控制范围内的顶板可以划分为4个象限,每个象限内的锚索均可与另外3个象限内的锚索产生一对对称的弯矩,共6对对称弯矩,使锚固巷道顶板的中性面下移,中性面呈“吊床”形,如图3所示。这样可以弱化甚至消除顶板中部区域的拉应力,从而使得顶板锚固区内大部分围岩处于压应力状态。

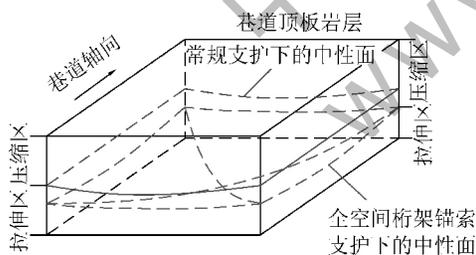


图3 全空间桁架锚索支护中性面变化

Fig.3 Variation of roof neutral surface under full space truss and anchor coordinative support

## 2 全空间桁架锚索协同支护的优越性

全空间预应力桁架锚索协同支护技术的优越性主要表现在:

1) 三向立体施力:全空间桁架锚索能从水平横向、水平轴向以及铅垂方向对巷道顶板锚固岩体同时施加主动预紧力,真正从三维立体角度改善大断面松软破碎巷道顶板浅部围岩应力状态,提高其自

承载能力。

2) 主被动支护耦合:加固顶板、两帮及底角斜锚滞后注浆,都是在改善围岩内部结构参数,通过主动支护来提升围岩的自承能力;通过四通托架、钢带和锚网把顶板、两帮和底板3个相对独立的支护结构联通,这是外部被动承载结构,主动与被动协同耦合,最终形成空间预应力桁架锚索协同支护系统。

3) 整体协同承载:顶板“2-1-2”布置的三排多根锚索通过专用拉紧构件相互连接,整体形成“十”字状,协调分配顶板载荷,防止支护局部过载失稳。有利于高预应力对顶板中部区域煤岩层整体加固作用,减少顶板离层和两帮围岩位移,降低顶板煤岩层受拉破坏<sup>[13,16-17]</sup>。此外,顶锚索和帮锚杆支护刚度与强度匹配,实现顶帮围岩协同变形。

4) 稳固抗剪:顶锚索斜穿煤帮肩角处顶板最大剪应力区,防止肩角处顶板发生剪切破坏<sup>[8]</sup>,锚固点位于巷道两帮深部上方稳定区域。

5) 结构闭锁:全空间桁架锚索能够在顶板形成具有自承载能力的闭锁小结构,该结构内岩体处于压应力状态,受外部环境影响较小。

6) 底角控鼓:全空间桁架锚索支护中增设打底角锚杆来控制底鼓,得出底角锚杆最优长度、位置及角度等参数。

此外,全空间预应力桁架锚索协同支护系统与传统桁架锚索、单体锚索支护的优越性比较见表1。

## 3 全空间桁架锚索协同支护方案设计

1) 顶板:选用直径20~22 mm的1×19股高强钢绞线锚索,长度为6~7 m,采用“2-1-2”布置,间排距2 m×1 m,其中“2”布置的锚索向两帮倾斜20°~30°,施加预紧力140~200 kN;采用直径20~22 mm的高强螺纹钢锚杆,长度2.2~2.4 m,间排距1 m×1 m,施加预紧转矩300~500 N·m,锚杆之间用钢带连接,并铺设规格为30 mm×30 mm的菱形金属网。

2) 两帮:采用直径20~22 mm的高强螺纹钢锚杆,长度为2.2~2.4 m,间排距1 m×1 m,顶板肩角处锚杆向上倾斜10°,施加预紧转矩300~500 N·m,锚杆之间用钢带连接,并铺设规格为30 mm×30 mm的菱形金属网。

3) 底角:采用管缝锚杆,沿45°~60°底角滑移线打设2根底角锚杆,间距500~600 mm,并进行注浆加固。

全空间桁架锚索协同支护承载系统:通过铺设金属网、架设钢带和安装四通托架并连接锁紧,将顶

板、两帮及底角3个相对独立支护结构连接成一套整体协同承载的全空间预应力桁架锚索支护体系。

表1 全空间桁架锚索协同支护与传统桁架锚索、单体锚索支护性能比较

Table 1 Performance comparison among full space truss and anchor coordinative support and conventional truss and anchor support and single anchor support

对比内容与指标	全空间桁架锚索控制系统	传统桁架锚索	单体锚索
适应的生产地质条件	大断面、松软破碎围岩	较大跨度、较完整围岩	中小跨度、一般围岩
锚固点位置	巷帮深部受压稳定岩体	巷帮较深部岩体	巷道顶板正上方
连接方式	刚柔协调连接	柔性连接	无水平方向连接
连接紧固件	专用拉紧构件	连接锁紧器	大托板、锁具
预紧力大小及方向	大,水平轴向与横向、铅垂向上	大,水平横向、铅垂向上	较大,铅垂向上
与被锚固岩体接触方式	网接触、连续传递	线接触、连续传递	点接触
结构特征	协调等强闭锁结构	等强闭锁结构	未形成结构
控制范围及顶板剪切	长、宽、高、强	长、较宽、较高、较强	短、宽、高、无
锚固区围岩应力状态	改善水平轴向、横向和铅垂方向应力	改善水平横向和铅垂方向应力	仅改善铅垂方向应力
支护方式	主被动支护耦合	主动支护	主动支护

#### 4 全空间桁架锚索支护数值模拟分析

全空间桁架锚索协同支护系统主要由桁架锚索围岩控制系统和高强锚杆控制系统组成。很多学者对高强锚杆控制作用进行了较深入的研究,本节主要对全空间桁架锚索控制系统进行数值模拟研究。模拟分析不同预紧力下,全空间桁架锚索顶板支护预应力场分布情况。

##### 4.1 全空间桁架锚索协同支护数值模型建立

根据王庄矿6207综放工作面回采巷道地质生产条件建立相应的FLAC<sup>3D</sup>数值计算模型,采用Mohr-Coulomb模型,模型尺寸为25 m×10 m×30 m,整个模型共划分为29 000个单元,33 099个节点,巷道尺寸为宽×高为5 m×4 m。选取巷道轴向为y轴方向,与巷道轴向垂直水平方向为x轴方向,竖直向上为z轴方向。模型周围各边界均为水平位移约束,底部为固定位移约束,上边界为自由边界。

为能够更准确的呈现全空间桁架锚索协同支护预应力场的空间结构,在不影响反映问题本质的前提下,模型上部不施加覆岩质量。全空间桁架锚索协同支护结构安设过程如下:先在巷道顶板打设5根长度为6 m的锚索,采用“2-1-2”的布置方式,间排距为2 m×1 m,对于“1”布置的锚索在巷道中央垂直于顶板打设,“2”布置的锚索向两帮倾斜45°打设,然后将四周的倾斜锚索与中央垂直于顶板的锚索通过托梁连接,并施加一定的预紧力。其中,煤岩

体的物理力学参数,见表2。

表2 模型中煤岩体力学参数

Table 2 Mechanical parameters of coal and rock mass in the model

煤岩层	体积模量/ GPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	抗拉强度/ MPa
细砂岩	5.8	1.3	37	4.0
砂质泥岩	4.5	1.1	32	2.6
煤	3.5	0.8	28	0.8
粉砂岩	5.2	1.2	35	2.8

##### 4.2 全空间桁架锚索支护顶板预应力场三维分布

将FLAC<sup>3D</sup>模拟结果采用TECLOT进行后处理,能够更加直观地了解不同预紧力(100、120、140、160、180、200 kN)条件下,全空间桁架锚索协同支护巷道顶板预应力场的三维空间分布规律。且为能呈现出全空间桁架锚索协同支护顶板三维预应力场内部结构特征,故截取模型的3/4进行分析,如图4所示,全空间预应力桁架锚索协同支护在顶板岩层中形成了一个具有一定自承载能力的三维封闭“预应力壳”小结构,该“预应力壳”结构内的岩体处于压应力状态,且桁架锚索预紧力越大,距离壳体中心越近,岩体应力状态越稳定。此外,“预应力壳”结构上部有4个下坠相连的“应力泡”,这是顶板4根倾斜锚索的锚固点,说明全空间桁架锚索将巷道顶板载荷转移到两帮深处稳定的岩体上。

4.3 全空间桁架锚索支护顶板预应力场二维分布  
第4.2节分析了全空间桁架锚索支护巷道顶板的三维空间分布规律,对其空间结构有了较深入的

认识。本节在巷道顶板0.5 m深度位置进行水平切片,得到不同预紧力支护条件下全空间桁架锚索协同支护的平面垂直应力场分布情况,如图5所示。

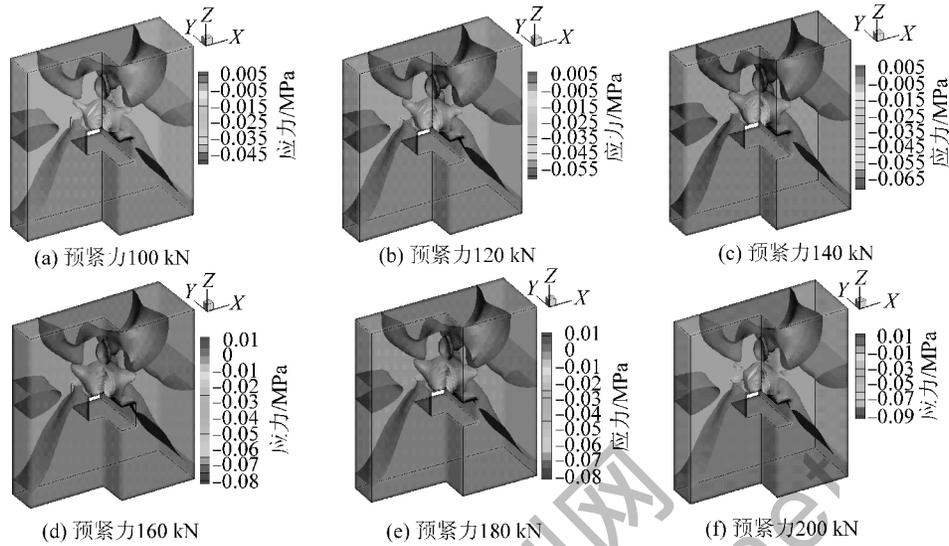


图4 不同预紧力全空间桁架锚索支护顶板垂直应力场三维空间分布

Fig. 4 3D distribution of roof vertical stress field with different pre-stress of full space truss and anchor coordinative support

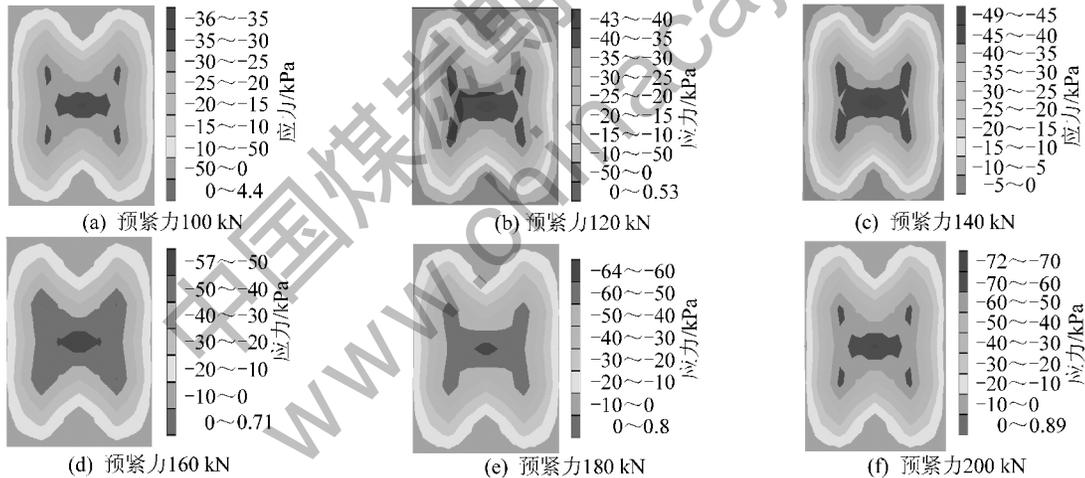


图5 不同预紧力全空间桁架锚索支护顶板垂直应力场二维分布

Fig. 5 2D distribution of roof vertical stress field with different pre-stress of full space truss and anchor coordinative support

由图5可以看出,全空间预应力桁架锚索支护巷道顶板0.5 m深度岩层形成了中心对称的闭合“蝴蝶”形预应力压缩带,压应力状态值整体从“蝴蝶”形中心向外逐步降低,且相同强度的压缩带范围随着预紧力的增大而增大。当桁架锚索预紧力分别为100、120、140、160、180、200 kN时,“蝴蝶”形中心的最大垂直应力分别为36、43、50、57、65、72 kPa。此外,巷道顶板预应力压缩带的范围在横向上基本覆盖了整个巷道顶板断面,走向上压缩带范围显著大于横向,可以通过设计桁架锚索排距,使得走向上压缩带相互叠加,从而实现顶板的

全空间控制。

## 5 结 论

1) 提出了全空间桁架锚索协同支护系统,并对其支护结构和支护机理进行分析,该支护系统将“顶板及时闭锁承载、两帮同时强控连顶、底角斜锚滞后注浆”3个相对独立支护结构组合成一套整体承载的空间预应力桁架锚索支护体系,实现协同承载与变形。

2) 全空间预应力桁架锚索协同支护技术的优越性主要表现在:三向立体施力、主被动支护耦合、

整体协同承载、稳固抗剪、结构闭锁、底角控鼓。

3) 全空间桁架锚索协同支护能够在顶板形成三维封闭的“预应力壳”,其内部岩体处于压应力状态,并将顶板载荷转移到两帮深处稳定的岩体上。

4) 全空间桁架锚索协同支护的顶板预应力压缩带呈对称的闭合“蝴蝶”形,压应力状态整体从“蝴蝶”形中心向外逐步降低,且相同强度的压缩带范围随着预紧力的增大而增大。

#### 参考文献(References):

- [1] 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 Manchao, Yang Jun, Yang Shengbin, 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.
- [2] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.  
He Manchao, Xie Heping, Peng Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [3] 谢生荣,张广超,何尚森,等.深部大采高充填开采沿空留巷围岩控制机理及应用[J].煤炭学报,2014,39(12):2362-2368.  
Xie Shengrong, Zhang Guangchao, He Shangsen, et al. Surrounding rock control mechanism and its application of gob-side retaining entry in deep backfilling with large mining height [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2362-2368.
- [4] 李化敏,付凯.煤矿深部开采面临的主要技术问题及对策[J].采矿与安全工程学报,2006,23(4):468-471.  
Li Huamin, Fu Kai. Some major technical problems and countermeasures for deep mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(4): 468-471.
- [5] 潘一山,肖永惠,李忠华,等.冲击地压矿井巷道支护理论研究及应用[J].煤炭学报,2014,39(2):222-228.  
Pan Yishan, Xiao Yonghui, Li Zhonghua, et al. Study of tunnel support theory of rock burst in coal mine and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 222-228.
- [6] 何满潮,高尔新.软岩巷道耦合支护力学原理及其应用[J].水文地质工程地质,1998(2):1-4.  
He Manchao, Gao Erxin. Mechanics of coupling support in soft rock roadway and its application [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1998(2): 1-4.
- [7] 何满潮,王炯,孙晓明,等.负泊松比效应锚索的力学特性及其在冲击地压防治中的应用研究[J].煤炭学报,2014,39(2):214-221.  
He Manchao, Wang Jiong, Sun Xiaoming, et al. Mechanics characteristics and applications of prevention and control rock bursts of the negative poisson's ratio effect anchor [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 214-221.
- [8] 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(22):1233-1239.  
Kang Hongpu, Wang Jinhua, Lin Jian. High pretensioned stress and intensive bolting system and its application in deep roadways [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(22): 1233-1239.
- [9] 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):1057-1066.  
Kang Hongpu, Wu Yongzheng, Li Jianbo. Analysis on mechanical performances and supporting function of combination components for rock bolting [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1057-1066.
- [10] 康红普.高强度锚杆支护技术的发展与应用[J].煤炭科学技术,2000,28(2):1-4.  
Kang Hongpu. Development and application of high strength bolt support technology [J]. Coal Science and Technology, 2000, 28(2): 1-4.
- [11] 刘泉声,刘学伟,黄兴,等.深井软岩破碎巷道底鼓原因及处置技术研究[J].煤炭学报,2013,38(4):566-572.  
Liu Quansheng, Liu Xuewei, Huang Xing, et al. Research on the floor heave reasons and supporting measures of deep soft-fractured rock roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 566-572.
- [12] 于斌.高强度锚杆支护技术及其在大断面煤巷中的应用[J].煤炭科学技术,2011,39(8):5-9.  
Yu Bin. High strength bolt support technology and application to mine large cross section seam gateway [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(8): 5-9.
- [13] 严红,何富连,徐腾飞.深井大断面煤巷双锚索桁架控制系统的研究与实践[J].岩石力学与工程学报,2012,31(11):2248-2258.  
Yan Hong, He Fulian, Xu Tengfei. Study of double-cable-truss controlling system for large section coal roadway of deep mine and its practice [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2248-2258.
- [14] 赵洪亮,姚精明,何富连,等.大断面煤巷预应力桁架锚索的理论与实践[J].煤炭学报,2007,32(10):1061-1065.  
Zhao Hongliang, Yao Jingming, He Fulian, et al. Application of prestress truss cable in large cross section coal roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(10): 1061-1065.
- [15] Li Jianping, He Fulian, Yan Hong, et al. The caving and sliding control of surrounding rocks on large coal roadways affected by abutment pressure [J]. Safety Science, 2012, 50(4): 773-777.
- [16] 陆庭侃,刘玉洲,于海湧.采区准备巷道层状复合顶板的离层和机理[J].岩石力学与工程学报,2005,24(S1):4663-4669.  
Lu Tingkan, Liu Yuzhou, Yu Haiyong. Separation characteristics and mechanisms of laminated composite roof strata of longwall roadway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S1): 4663-4669.
- [17] 张农,袁亮.离层破碎型煤巷顶板的控制原理[J].采矿与安全工程学报,2006,23(1):34-38.  
Zhang Nong, Yuan Lian. Control principle of separating and broken roof rock strata in roadway [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 34-38.