

文章编号: 1673-3363-(2012)02-0191-06

# 大变形锚杆索协调防冲支护的理论研究

王平<sup>1</sup>, 姜福兴<sup>2</sup>, 王存文<sup>2</sup>, 孔令海<sup>2</sup>

(1. 北京矿冶研究总院, 北京 100070; 2. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

**摘要** 在强冲击大变形巷道支护中, 锚杆、锚索是否联合协调防冲支护, 不仅关系巷道在施工期间的安全, 还直接影响巷道支护的长期安全性。结合锚杆、锚索联合对强冲击大变形巷道进行支护时容易普遍出现锚杆、锚索破断的问题, 介绍了适合于强冲击大变形巷道支护的大变形锚杆(索)的主要结构特点及其让压性能, 并对锚杆、锚索协调防冲原理和设计准则进行了研究分析。在此基础上, 通过对大变形锚杆(索)的实验研究, 给出了不同冲击条件下大变形锚杆(索)实验设计方法。研究结果对今后强冲击大变形巷道的支护设计施工有一定的参考价值。

**关键词** 巷道支护; 围岩; 让压性能; 锚杆; 锚索

**中图分类号** TD 353 **文献标识码** A

## The Study on Coordination for Avoiding Impact Using Bolt and Anchor Cable with Large Deformation

WANG Ping<sup>1</sup>, JIANG Fu-xing<sup>2</sup>, WANG Cun-wen<sup>2</sup>, KONG Lin-hai<sup>2</sup>

(1. Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100070, China;  
2. School of Civil & Environmental Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract** Under the roadway support of large deformation caused by strong impact, it could be safety when bolt coordinates with anchor cable on anti-rocksburst supporting. That kind of support not only relates with the safety during construction, but also influences the long-term safety of roadway support. When bolt and anchor cable union support the roadways with large deformation is used in condition of strong impact, the bolt and anchor cable will be easily destroyed. So the paper introduces the main construction and yield pressure features about the large deformation bolt (anchor cable) suited to the roadways with large deformation caused by strong impact. The coordination of anti-rocksburst principle and design criteria of the research about bolt and anchor support has been analyzed at the same time. On the base of experimental research of the large deformation of bolt (anchor cable), the experimental design method under different impact conditions have been given. Research result has certain reference value to the support design construction of the roadways with large deformation caused by strong impact.

**Key words** roadway support; surrounding rock; yield pressure feature; bolt; anchor cable

收稿日期: 2011-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(40674017, 50774012); 国家“十一五”科技支撑计划项目(2007BAK24B04); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226803)

作者简介: 王平(1983-), 男, 江西省抚州市人, 工程师, 博士, 从事矿山压力与岩层控制的研究。

E-mail: wangping20082006@126.com

Tel: 18611202128

锚杆、锚索支护在国内外<sup>[1-7]</sup>矿山得到了广泛的应用,已成为矿井巷道围岩支护的主要方式之一。然而在工程应用中发现,使用锚杆与锚索联合对强冲击大变形巷道进行支护时,锚杆、锚索普遍出现了大量的断裂或损坏,严重影响到巷道的安全。

传统锚杆、锚索联合支护已不能满足强冲击大变形巷道支护的需求,主要表现为大量锚杆、锚索的破断。而造成锚杆、锚索破断的主要原因为:1)锚杆和锚索支护体系不能满足巷道围岩大变形的需求;2)锚杆、锚索在围岩变形过程中被逐个击破,不能协同对巷道围岩进行支护;3)当发生冲击后,锚杆、锚索都被损坏,从而不能保持支护体系的完整性。

为此,选择可延伸锚杆、锚索对强冲击大变形巷道进行支护显得尤为重要。目前,一些可延伸锚杆、锚索在巷道支护中有着较为广泛的应用<sup>[8-15]</sup>,但是在很多时候也都难以满足强冲击大变形巷道支护的要求。其不足主要表现为:1)锚杆、锚索延伸量有限,不能满足大变形巷道的要求;2)不能达到锚杆、锚索的协调让压支护;3)让压设计不合理;4)让压结构太复杂,加工不便,成本高。

综上所述,选择具有大变形、协同性、防冲击和高强度特性的锚杆、锚索联合支护体系,是解决强冲击大变形巷道支护的关键。为了阐述方便,“大变形-协同性-防冲击-高强度”简称为“ $L_d-S_y-P_b-H_s$ ”。

## 1 “ $L_d-S_y-P_b-H_s$ ” 支护体设计

“ $L_d-S_y-P_b-H_s$ ” 支护体是针对强冲击大变形巷道而专门设计的。该支护体是利用锚杆、锚索的可

延伸性,以达到预期支护的要求,可延伸锚杆(索)结构如图 1 所示。

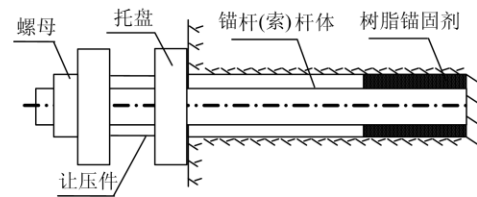


图 1 大变形锚杆(索)结构

Fig.1 Large deformation of bolt (cable) structure

该可延伸的锚杆(索)主要由锚杆(索)杆体、托盘、让压件以及螺母等部件组成。与普通的锚杆(索)相比,大变形锚杆(索)在锚杆(索)尾部增加一个具有特殊让压功能的让压件。通过让压件让压变形,以达到锚杆、锚索协调支护,从而使锚杆、锚索联合支护体系能够最大限度适应巷道围岩的变形。大变形锚杆(索)具有伸缩量可调、延伸量大、支护强度高等特点。

## 2 “ $L_d-S_y-P_b-H_s$ ” 支护体协同防冲工作原理和设计准则

### 2.1 “ $L_d-S_y-P_b-H_s$ ” 支护体协同防冲工作原理

巷道掘出后,首先在巷道围岩中打一圈长度为  $L$  的锚杆,此时将在围岩中形成厚为  $L$  的锚杆支护圈(如图 2a 所示)。随着围岩的变形,锚杆支护体系的变形量将逐渐增加,当锚杆支护系统位移量达到  $\varepsilon_1$  时,在顶部和帮部打长度为  $S$  的锚索,锚索的安装使围岩中形成厚为  $S$  的锚索支护圈,此后,锚索和锚杆支护体系将随着围岩变形而一起变形,即锚杆、锚索协同对巷道进行支护作用,如图 2b 所示。

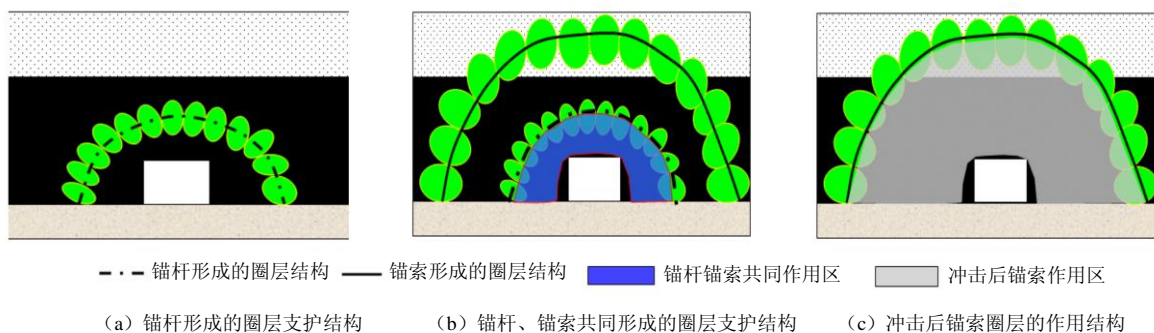


图 2 锚杆与锚索圈层防冲支护结构

Fig.2 Anti-rockburst supporting structure of bolt and cable spheres

当锚杆和锚索支护体系在围岩变形过程中突然受到冲击时,此时围岩变形量瞬间超过锚杆支护

体系的最大变形量  $\varepsilon_2$ , 锚杆将失去悬吊作用, 但成拱作用依然存在。冲击完成后, 巷道围岩破坏范围

仍处在锚索支护圈层以内,如图 2c 所示,同时锚索支护系统的变形量仍小于锚索支护系统的最大变形量  $\varepsilon_3$ ,此时锚索悬吊作用将继续维持巷道围岩的稳定,从而保持支护系统的完整性,此即为锚杆、锚索联合防冲支护的基本原理。

综上分析可得,锚杆、锚索的强度和变形量之间的协调是实现防冲支护的关键。原理图见图 3 所

示。图 3 中符号所代表的含义为: $R_{杆}$ 为锚杆预紧力, $R_{索}$ 为锚索预紧力, $R_{合1}$ , $R_{合2}$ , $R_{合i}$ 分别为锚杆、锚索联合支护结构的初撑力、最大锚固力和锚固力; $\varepsilon_i$ 为锚杆、锚索共同支护结构的变形量。

图 3e 中,圈层支护结构的 3 个工作区段为:A 区为锚杆单独工作区;B 区为锚杆、锚索协同工作区;C 区为锚索单独工作区。

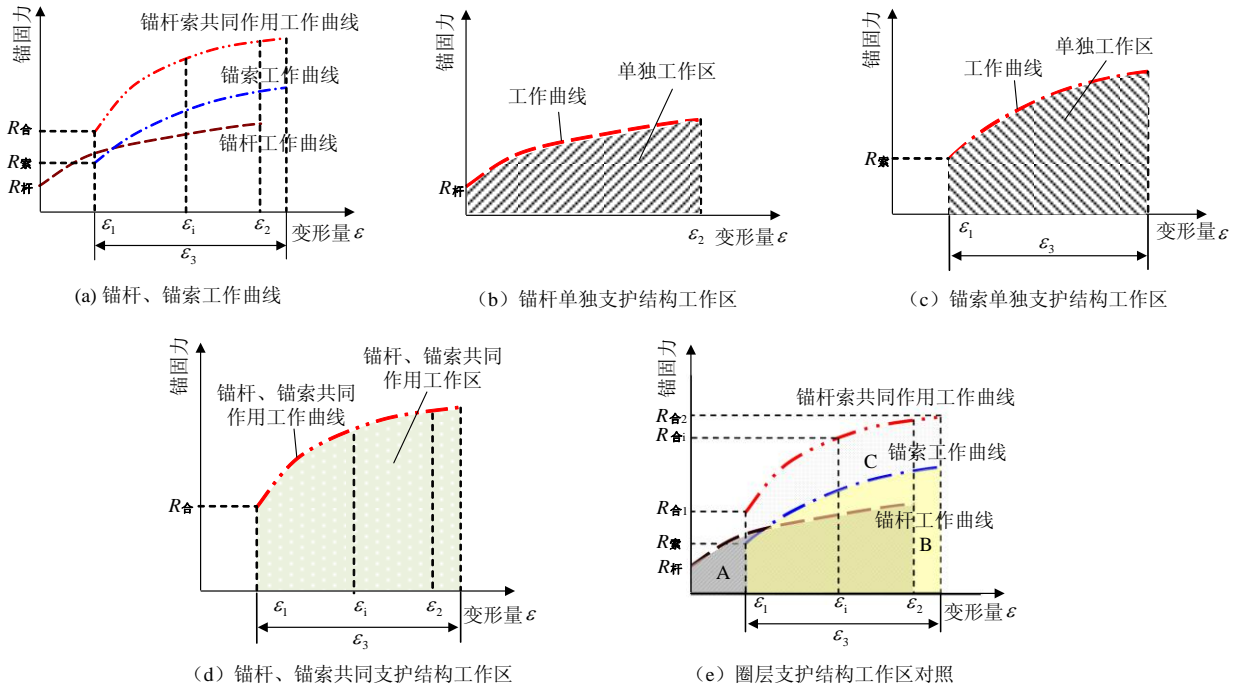


图 3 锚杆与锚索圈层防冲支护结构工作曲线

Fig.3 Working curve of anti-rockburst supporting structure of bolt and cable spheres

图 3a, e 中锚杆索共同作用的圈层支护结构的锚固力  $R_{合i}$  (即锚杆索共同作用时工作曲线的锚固力) 应满足下式

$$M_{\max}[R_{杆i}, R_{索i}] < R_{合i} < R_{杆i} + R_{索i} \quad (1)$$

式中: $R_{杆i}$ 为锚杆单独支护时的锚固力, $R_{索i}$ 为锚索单独支护时的锚固力。从式(1)和图 3 中可以明显看出,锚杆锚索在协同工作阶段的支护强度,明显要比锚杆和锚索单独支护时大,且此阶段支护强度达到最大值。

## 2.2 “L<sub>a</sub>-S<sub>y</sub>-P<sub>b</sub>-H<sub>s</sub>”支护体协同防冲分析

巷道掘出后,在巷道顶板及两帮打 1 圈锚杆,锚杆的锚固、挤压、悬吊作用使巷道围岩形成第 1 层圈层支护结构;待掘进的巷道经过一定变形后,在巷道上部及两侧打 1 圈锚索,锚索的悬吊和挤压作用,使深部煤(岩)体形成范围较大的第 2 层圈层支护结构(如图 2 所示)。

2 圈层支护结构在围岩变形的不同阶段起到不同的作用,具体分析如下:

1) 围岩变形量小于  $\varepsilon_1$  时,对围岩变形起控制作用的是锚杆形成的圈层支护结构。

2) 围岩变形大于  $\varepsilon_1$  小于  $\varepsilon_2$  时,锚杆形成的圈层支护结构和锚索形成的圈层支护结构共同发挥控制作用。

3) 围岩变形大于  $\varepsilon_2$  时,如发生冲击地压,锚杆形成的圈层支护结构将遭到破坏,只有锚索形成的圈层支护结构独立起作用。锚索形成的圈层支护结构将防止巷道出现垮塌,从而起到防灾作用。

上文中, $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  具体数值需根据现场监测的数据以及锚杆、锚索力学性质、支护参数设计等共同确定。

### 2.3 “ $L_d-S_y-P_b-H_s$ ” 支护体协同防冲支护结构设计准则

“ $L_d-S_y-P_b-H_s$ ” 支护体协同防冲支护的结构设计需从支护强度和变形协调两个方面考虑。

#### 1) 强度准则

锚杆支护圈层的支护强度准则

$$P_g = k h \quad (2)$$

式中:  $P_g$  为锚杆支护体系强度,  $\text{kN/m}^2$ ;  $k$  为安全系数, 一般大于 2;  $h$  为锚杆有效长度, 可由工程类比或理论计算得出;  $\gamma$  为岩石容重, 煤一般为  $1.3 \text{ t/m}^3$ , 岩石为  $2.5 \text{ t/m}^3$  左右。

根据  $P_g$  值和所选锚杆的强度, 可以算出锚杆支护密度。

锚索支护体系极限强度可以由下式表示

$$P_s = q R \gamma \quad (3)$$

式中:  $P_s$  为锚索支护体系极限强度,  $\text{kN/m}^2$ ;  $q$  为安全系数, 一般大于 2;  $R$  为冲击后巷道破裂区厚度, 由经验估计或实测得到。锚索长度  $S$  要大于  $R$ , 即

$$S > R \quad (4)$$

#### 2) 变形协调准则

##### ① 锚杆支护系统变形与围岩变形协调

设巷道开掘后, 形成松动圈的厚度为  $B_1$ , 此时锚杆支护对象除了松动圈自重和巷道围岩部分弹塑性变形外, 松动圈围岩的碎胀往往占据主导地位, 因此, 为了最大限度的限制松动圈围岩碎胀所造成的有害变形, 锚杆支护系统中锚杆长度  $L_{杆}$  必须满足公式 (5)

$$L_{杆} > B_1 \quad (5)$$

##### ② 锚杆、锚索支护系统变形协调

在围岩逐渐变形过程中, 由于受锚索延伸性能限制, 锚索很容易达到其极限长度而被拉断, 所以应保持锚杆和锚索支护系统之间变形协调, 即须满足下式

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \leq \varepsilon_3 \quad (6)$$

##### ③ 锚杆、锚索支护系统变形与围岩变形协调

冲击发生后, 设此时巷道总变形量为  $B_2$ , 则锚杆、锚索支护系统总变形量必须满足公式 (7), 即保持锚杆、锚索支护系统变形与围岩变形的协调

$$B_2 < \varepsilon_1 + \varepsilon_3 \quad (7)$$

合理的 “ $L_d-S_y-P_b-H_s$ ” 支护体协同防冲支护结构设计准则需要同时满足公式 (2) ~ (7)。

### 3 “ $L_d-S_y-P_b-H_s$ ” 支护体实验研究

基于对 “ $L_d-S_y-P_b-H_s$ ” 支护体协同防冲机理及其支护结构设计准则的研究, 本文通过对不同性能让压件的实验研究, 从而得到能根据不同冲击条件选择合适其巷道 “ $L_d-S_y-P_b-H_s$ ” 支护体的设计方案。

#### 3.1 让压件选择的力学参数

根据冲击巷道围岩条件的不同, 可以设计成不同的规格让压件。让压件的基本设计参数为:

1) 让压点: 让压件开始让压时的让压载荷, 其中锚杆、锚索的让压载荷都应大于其预紧力, 小于锚杆 (索) 屈服强度<sup>[11]</sup>。不同结构锚杆、锚索选择的让压点也不同。

2) 最大让压距离: 让压件从开始让压到压实到最小值时的变形量。

3) 让压件让压期间的稳定载荷: 即让压管达到让压点后载荷趋近稳定的值。

#### 3.2 “ $L_d-S_y-P_b-H_s$ ” 支护体中锚杆 (索) 让压件让压载荷的确定

在冲击型巷道中, 由于让压锚杆 (索) 容易受到冲击载荷的作用, 所以让压锚杆 (索) 让压点载荷应满足下式

$$R_{杆}(R_{索}) \leq k X_{杆}(X_{索}) \leq T_{杆}(T_{索}) \quad (8)$$

式中:  $X_{杆}(X_{索})$  为让压锚杆 (索) 让压点载荷;  $T_{杆}(T_{索})$  为锚杆 (索) 破断力;  $k$  ( $k$  取值由现场具体条件确定) 为锚杆 (索) 受冲击时载荷的集中系数。化简式 (8) 可得冲击型巷道中的让压锚杆 (索) 的让压载荷应满足公式

$$R_{杆}(R_{索})/k \leq X_{杆}(X_{索}) \leq T_{杆}(T_{索})/k \quad (9)$$

#### 3.3 “ $L_d-S_y-P_b-H_s$ ” 支护体中让压件力学性质的实验研究

通过对不同规格让压件的单轴压力试验, 得到不同规格让压件具有的让压性能, 并得出不同规格让压件让压性能的变化规律。不同规格让压件的应力位移曲线如图 4, 5 所示。从图中可以明显看出, 让压件让压工作过程为: 当让压件达到让压点 (让压件单轴最大抗压强度) 后, 让压件所受应力下降, 当下降到一定程度后, 应力沿某一压力值上下小幅波动。让压件最大让压位移量可达 6 cm 左右。

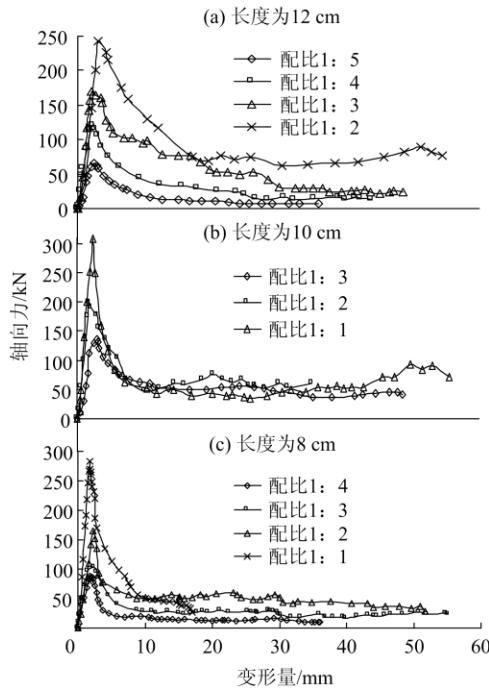


图4 同一长度不同配比规格为1的让压件  
轴向力-位移曲线

Fig.4 Stress-displacement relationship curves of yield pressure parts with specification of 1 with the same length and different proportion under uniaxial compression

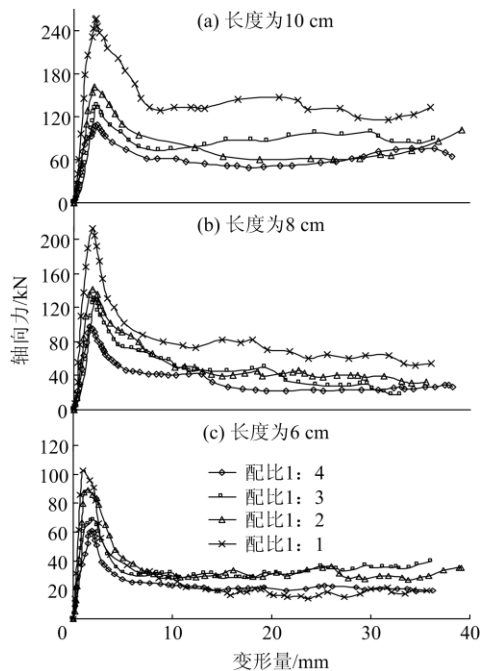
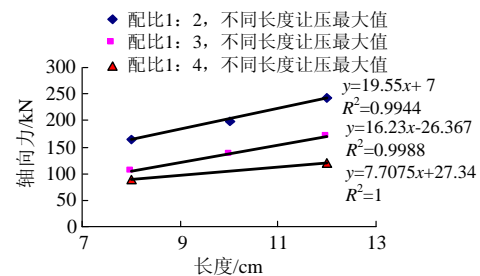


图5 同一长度不同配比规格为2的让压件  
单轴应力-位移曲线

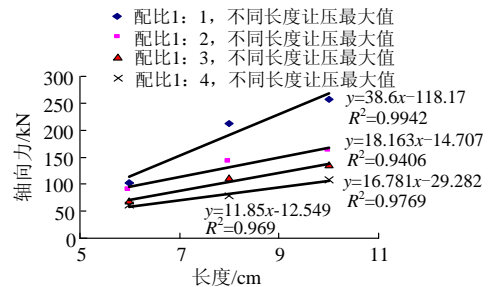
Fig.5 Stress-displacement relationship curves of yield pressure parts with specification of 2 with the same length and different proportion under uniaxial compression

### 3.4 “ $L_d-S_y-P_b-H_s$ ”支护体实验设计

首先根据锚杆、锚索协调防冲支护结构设计的变形协调准则, 确定“ $L_d-S_y-P_b-H_s$ ”支护体中锚杆(索)让压件的最大让压位移量, 并根据不同长度不同规格让压件的单轴应力曲线(如图4, 5, 图中配比是表示让压件的材料中充填物的配比), 选取能满足锚杆(索)让压件的最大让压位移量的让压件材料, 即选择规格1或规格2的构件材料作为让压件; 其次按照所选锚杆(索)固有性质(强度准则), 选取合适的让压点载荷, 并根据不同规格让压件单轴抗压峰值拟合曲线(如图6), 确定锚杆(索)让压件长度; 当同一规格不同长度的让压件都能满足以上要求时, 则通过判定不同让压件让压期间的稳定载荷, 选取让压期间最大稳定载荷的让压件作为锚杆(索)的让压件。



(a) 不同长度规格为1



(b) 不同长度规格为2

图6 不同规格让压件单轴抗压峰值拟合曲线

Fig.6 Fitting curve of single-axis compression peak value for different specifications

## 4 结论

1) 针对强冲击大变形巷道支护中容易出现锚杆、锚索的大量破断, 提出了利用“ $L_d-S_y-P_b-H_s$ ”支护体对强冲击大变形巷道进行支护思路, 并得出了“ $L_d-S_y-P_b-H_s$ ”支护体防冲支护的工作原理为: 锚杆圈层首先对巷道进行支护, 其次锚杆和锚索圈层共同对巷道进行支护, 此阶段支护强度达到最大值, 发生冲击后仅锚索圈层对巷道进行支护。



2) 通过对“ $L_d-S_y-P_b-H_s$ ”支护体中让压件的实验研究分析, 得到了不同冲击条件下的巷道可选择不同的“ $L_d-S_y-P_b-H_s$ ”支护体的设计准则。

3) 本文的研究结果表明, 采用大变形锚杆索协调防冲支护体能很好解决强冲击大变形巷道支护问题。

### 参考文献:

- [1] 康红普, 林健, 吴拥政. 全断面高预应力强力锚索支护技术及其在动压巷道中的应用[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1154-1159.  
KANG Hong-pu, LIN Jian, WU Yong-zheng. High pretensioned stress and intensive cable bolting technology set in full section and application in entry affected by dynamic pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1154-1159.
- [2] 何满潮, 苏永华, 孙晓明, 等. 锚杆支护煤巷稳定性可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1810-1814.  
HE Man-chao, SU Yong-hua, SUN Xiao-ming, et al. Reliability analysis of stability of coal roadway supported by rock-bolt, 2002, 21(12): 1810-1814.
- [3] 吴志祥, 赵英利, 梁建军, 等. 预应力注浆锚索技术在加固大巷中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2001, 29(8): 10-12.  
WU Zhi-xiang, Zhao Ying-li, LIANG Jian-jun, et al. Pre-stressed grout bolting technology applied to reinforcement of mine large cross section roadway [J]. Coal Science and Technology, 2001, 29 (8): 10-12.
- [4] 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.
- [5] 张农, 高明仕, 许兴亮. 煤巷预拉力支护体系及其工程应用[J]. 矿山压力与顶板理, 2002, 19(4): 1-4.  
ZhANG Nong, GAO Ming-shi, XU Xing-liang. Pre-tensioned supporting system of roadway and its engineering application[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2002, 19(4): 1-4.
- [6] 康红普, 林健, 张冰川. 小孔径预应力锚索加固困难巷道的研究与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (3): 387-390.  
KANG Hong-pu, LIN Jian, ZHANG Bing-chuan. Study on small borehole pretensioned cable reinforcing complicated roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (3): 387-390.
- [7] 漆太岳, 陆士良, 高波. 大变形巷道锚杆的力学特性[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(5): 354-357.  
QI Tai-yue, LU Shi-liang, GAO Bo. Mechanical characteristics of rock bolts in roadways with large deformation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(5): 354-357.
- [8] 郭颂. 美国煤巷锚杆支护技术概况[J]. 煤炭科学技术, 1998, 26(4): 50-54.  
GUO Song. The United States bolt support technology situation [J]. Coal Science and Technology, 1998, 26(4): 50-54.
- [9] 李铀, 朱维申, 白世伟, 等. 一种适用于大变形巷道的新型可延伸锚杆[J]. 中南公路工程, 2007, 32(2): 103-106.  
LI You, ZHU Wei-shen, BAI Shi-wei, et al. New extensible boltsuitable for large deformation support[J]. Central South Highway Engineering, 2007, 32(2): 103-106.
- [10] 程家洋. 让压支护技术在高压、高变形巷道的应用[J]. 煤炭工程, 2004(5): 79-80.  
CHEN Jia-yang. Application of yielding support technology on high stress and deformation tunnel[J]. Coal Engineering, 2004(5): 79-80.
- [11] 连传杰, 徐卫亚, 王志华. 一种新型让压管锚杆的变形特性及其支护作用机理分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(2): 242-247.  
LIAN Chuan-jie, XU Wei-ya, WANG Zhi-hua. Analysis of deformation characteristic and supporting mechanism of a new typed yielding anchor bolt [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(2): 242-247.
- [12] 侯朝炯, 郭宏亮. 我国煤巷锚杆支护技术的发展方向[J]. 煤炭学报, 1996, 21(2): 113-118.  
HOU Chao-jiong, GUO Hong-liang. Orientation of technical development of rock bolting in in-seam gateways in China[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(2): 113-118.
- [13] 连传杰, 韦立德, 王阁. 高预应力让压锚杆数值模拟方法研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1437-1443.  
LIAN Chuan-jie, WEI Li-de, WANG Ge. Development of 3D numerical simulating methods for high prestressed yield bolts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1437-1443.
- [14] 李海燕, 李伟, 李术才, 等. 新型高预应力锚杆支护技术的研究及应用[J]. 山东大学学报, 2008, 38(6): 51-54.  
LI Hai-yan, LI Wei, LI Shu-cai, et al. Research and application on the supporting technology of a new high-prestressed bolt[J]. Journal of Shandong University, 2008, 38(6): 51-54.
- [15] 张成新, 李海燕, 庄金波. 水力式膨胀锚杆的试验应用[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(2): 18-20.  
ZHANG Cheng-xin, LI Hai-yan, ZHUANG Jin-bo. Test and application of hydraulic swelling bolt[J]. Coal Science and Technology, 2002, 30(2): 18-20.