

文章编号: 1673-3363-(2012)05-0657-05

# 锚杆预紧力对煤矿巷道支护效果的响应特征研究

常聚才, 谢广祥

(安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要** 为从理论上揭示锚杆预紧力对巷道支护效果的作用机理, 针对锚杆支护岩石巷道, 建立了分析巷道围岩力学特征的理想弹塑性应变软化模型, 获得施加预紧力锚杆支护后巷道围岩位移、应力分布的解析表达式, 从理论上表明: 提高锚杆预紧力对控制巷道围岩变形及改善巷道周边围岩的应力状态有积极的作用, 有利于保持巷道围岩的稳定。并结合现场实际研究了锚杆预紧力对巷道支护效果的影响关系, 研究成果对分析锚固作用机理及进行锚杆支护设计具有指导意义。

**关键词** 岩石巷道; 锚杆支护; 预紧力; 支护效果; 理论分析

**中图分类号** TD 353

**文献标识码** A

## Research on Response Characteristics of Bolt Pretension on Supporting Effect of Rock Roadway in Coal Mine

CHANG Ju-cai, XIE Guang-xiang

(School of Mining and Safety Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

**Abstract** In this paper, to theoretically demonstrate the action mechanism of bolt pretension on supporting effect of roadway, the ideal elasto-plastic strain-softening model is established to analyze the mechanical characteristics of bolt supporting in rock roadway. Thus, the analytical expressions of displacement, stress distribution in roadway surrounding rock after pre-stressed bolt supporting are obtained. The theoretical analysis results show that improving the bolt pretension can improve the stress states of surrounding rock around the roadway and control the roadway deformation effectively, which is beneficial to maintain the roadway stability. Moreover, the influence relation of bolting pretension on roadway supporting effect is further studied based on field measurements. The research results can provide theoretical basis for analyzing the bolting action mechanism and bolt supporting design.

**Key words** rock roadway; bolts supporting; bolt pretension; supporting effect; theoretical analysis

目前锚杆支护技术在煤矿中已经得到大面积推广应用, 成为煤矿巷道首选的、安全高效的主要支护方式<sup>[1-4]</sup>。而预紧力作为锚杆支护的一个重要参数之一, 国内外学者对锚杆(索)预紧力的作用机理进行了一定的研究, 从数值分析及现场实践中已基本阐明提高锚杆预紧力有利于保持巷道围岩稳定的作用机理<sup>[5-9]</sup>。而从理论上研究煤矿巷道中锚杆

预紧力的作用机理还不够深入, 没有形成统一的理论体系, 特别是锚杆预紧力对煤矿巷道支护效果的影响特征理论研究较少, 有必要进行深入研究。

### 1 计算模型

根据岩石的全应力-应变曲线, 其变形可看成是处于弹性区、塑性破坏区和破裂区3种状态(图

收稿日期: 2011-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51204006); 安徽省杰出青年基金项目(1108085J02); 安徽理工大学优秀创新学术团队项目(20091801)

作者简介: 常聚才(1979-), 男, 山东省临沂市人, 博士、副教授、硕士生导师, 从事矿山压力与巷道支护方面的研究。

E-mail: cjcminecoal@163.com

Tel: 0554-66687365

1), 而巷道围岩亦处于破裂区、塑性区和弹性区 3 种状态。为分析方便, 实际岩石的应力-应变曲线用图 1 中折线代替, 即峰值强度前的变形为线弹性变形; 岩石达到强度极限后为理想塑性状态, 但发生应变软化现象<sup>[10-12]</sup>。

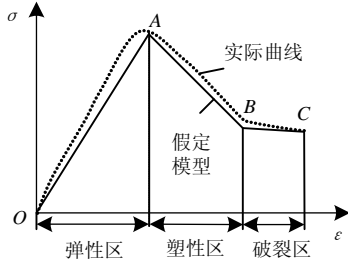
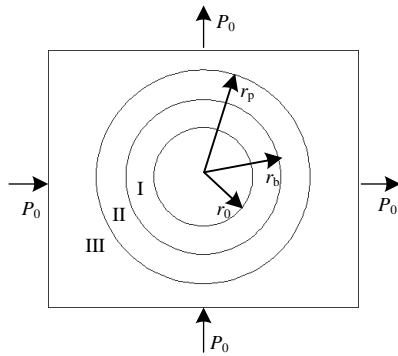


图 1 岩石应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of rocks

设无限长圆形巷道处于原岩应力为  $P_0$  各向等压的均匀应力场中, 围岩为均质、各向同性的连续介质;  $r_0$  为巷道半径,  $r_p$  为塑性区半径,  $r_b$  为破裂区半径 (图 2)。当有锚杆支护时, 假定锚杆在围岩中均匀分布, 将全长锚固锚杆的锚固力简化为围岩中均匀分布的体积力<sup>[13]</sup>。则对于开掘在各向等压应力场中的圆形巷道, 考虑锚杆作用时, 可以简化为一个轴对称平面应变问题, 满足弹塑性理论。



I—破裂区; II—塑性区; III—弹性区

图 2 巷道围岩状态分区

Fig.2 Subzones of the roadway surrounding rock

## 2 锚杆支护范围外巷道围岩位移及应力分布规律

设长度为  $l$  的锚杆完全处于破裂区内, 锚杆支护范围以外巷道围岩位移及应力分布规律可视为与无支护时相同<sup>[10-12]</sup>。

巷道围岩位移表达式为:

$$\text{弹性区 } u_r^e = \varepsilon_\theta^e r = B \frac{r_p^2}{r} \quad (1)$$

$$\text{塑性区 } u_r^p = \frac{2B}{m+1} \cdot \frac{r_p^{m+1}}{r^m} + \frac{m-1}{m+1} Br \quad (2)$$

破裂区内锚杆支护范围以外 ( $r \geq r_0 + l$ ):

$$u_r^b = \frac{2B}{n+1} \frac{r_p^{m+1}}{r_b^{m-n}} r^{-n} + \frac{D_1}{n+1} r \quad (3)$$

$$\text{式中: } B = \frac{1+\mu}{E} [P_0 \sin \varphi + \frac{\sigma_c}{2} (1 - \sin \varphi)]$$

$$D_1 = \frac{2B(n-m)}{m+1} \left( \frac{r_p}{r_b} \right)^{m+1} + \frac{(n+1)(m-1)}{m+1} B$$

$\sigma_c$  为岩体的单轴抗压强度;  $\varphi$  为岩体的内摩擦角;  $E$ ,  $\mu$  为岩体的弹性模量及泊松比;  $m$  为应变软化阶段的体积膨胀系数;  $m = \frac{1+\sin \varphi}{1-\sin \varphi}$ ;  $n$  为残余强度

阶段岩石的体积膨胀系数;  $n = 1.3 \sim 1.5$ 。

巷道围岩径向应力  $\sigma_r$  和切向应力  $\sigma_\theta$  为:

弹性区

$$\sigma_r^e = P_0 - \frac{r_p^2}{r^2} [P_0 \sin \varphi + \frac{\sigma_c}{2} (1 - \sin \varphi)] \quad (4)$$

$$\sigma_\theta^e = P_0 + \frac{r_p^2}{r^2} [P_0 \sin \varphi + \frac{\sigma_c}{2} (1 - \sin \varphi)] \quad (5)$$

塑性区

$$\sigma_r^p = D_2 \left( \frac{r}{r_p} \right)^{K_p-1} + \frac{2M_0 B}{m+1} \quad (6)$$

$$\left[ \frac{1}{K_p+m} \left( \frac{r_p}{r} \right)^{m+1} - \frac{1}{K_p-1} \right] - \frac{\sigma_c}{K_p-1}$$

$$\sigma_\theta^p = K_p \left\{ D_2 \left( \frac{r}{r_p} \right)^{K_p-1} + \frac{2M_0 B}{m+1} \right.$$

$$\left. \left[ \frac{1}{K_p+m} \left( \frac{r_p}{r} \right)^{m+1} - \frac{1}{K_p-1} \right] - \frac{\sigma_c}{K_p-1} \right\} +$$

$$\sigma_c - \frac{2M_0 B}{m+1} \left( \frac{r_p^{m+1}}{r^{m+1}} - 1 \right) \quad (7)$$

破裂区内锚杆支护范围以外 ( $r \geq r_0 + l$ ):

$$\sigma_r^b = D_2 \left( \frac{r}{r_p} \right)^{K_p-1} + D_3 \left( \frac{r}{r_b} \right)^{K_p-1} - \frac{\sigma_c^*}{K_p-1} \quad (8)$$

$$\sigma_\theta^b = D_2 K_p \left( \frac{r}{r_p} \right)^{K_p-1} + D_3 K_p \left( \frac{r}{r_b} \right)^{K_p-1} + \frac{K_p-2}{K_p-1} \sigma_c^* \quad (9)$$

$$\text{式中: } K_p = \frac{1+\sin \varphi}{1-\sin \varphi}$$

$$D_2 = \left[ \frac{2}{K_p+1} \left( P_0 + \frac{\sigma_c}{K_p-1} \right) + \frac{2M_0 B}{(K_p+m)(K_p-1)} \right]$$

$$D_3 = \left( \frac{1}{K_p + m} - \frac{1}{K_p - 1} \right) \left[ (\sigma_c - \sigma^*) + \frac{2M_0 B}{m+1} \right]$$

$\sigma_c^*$  为岩体的残余强度。

### 3 锚杆支护范围内巷道围岩位移及应力分布规律

破裂区中锚杆支护范围内 ( $r_0 \leq r \leq r_0 + l$ ) 其围岩径向应变  $\varepsilon_r^{bm}$  和切向应变  $\varepsilon_\theta^{bm}$  可表示为:

$$\begin{cases} \varepsilon_r^{bm} = \varepsilon_r^b|_{r=r_0+l} + \Delta\varepsilon_r^{bm} \\ \varepsilon_\theta^{bm} = \varepsilon_\theta^b|_{r=r_0+l} + \Delta\varepsilon_\theta^{bm} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\Delta\varepsilon_r^{bm}$ ,  $\Delta\varepsilon_\theta^{bm}$  分别为锚固范围内径向应变和切向应变的增量。

根据非关联流动法则,  $\Delta\varepsilon_r^{bm}$ ,  $\Delta\varepsilon_\theta^{bm}$  的关系为:

$$\Delta\varepsilon_r^{bm} + n' \Delta\varepsilon_\theta^{bm} = 0 \quad (11)$$

$n'$  为锚固体处于残余强度状态时的体积膨胀系数,  $1 < n' < n$ 。

联立式 (10)、(11) 及几何方程可得

$$\frac{du_r^{bm}}{dr} + n' \frac{u_r^{bm}}{r} = \varepsilon_r^b|_{r=r_0+l} + n' \varepsilon_\theta^b|_{r=r_0+l} \quad (12)$$

解微分方程 (12) 并由位移连续条件, 在  $r = r_0 + l$  处,  $u_r^b = u_r^{bm}$ , 求得破裂区锚固范围内围岩的径向位移  $u_r^{bm}$ :

$$u_r^{bm} = \frac{C_5}{r^{n'}} + \frac{D_5}{n'+1} r \quad (13)$$

式中:  $C_5 = \frac{2B}{n'+1} \cdot \frac{r_p^{m+1}}{r_b^{m-n}} (r_0 + l)^{n'-n}$

$$D_5 = \frac{2B}{n+1} \cdot \frac{r_p^{m+1}}{r_b^{m-n}} (r_0 + l)^{-(n+1)} (n' - n) + \frac{D_1}{n+1} (n' + 1)$$

破裂区中锚杆支护范围内 ( $r_0 \leq r \leq r_0 + l$ ), 设对全长锚固锚杆施加的预紧力为  $p_0$ , 锚杆的受力如图 3 所示<sup>[14-15]</sup>。

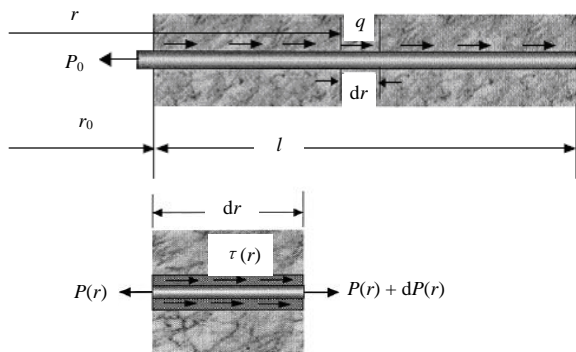


图3 锚杆与围岩受力分析图

Fig.3 Mechanical model of bolts and surrounding rock

取一厚度为  $dr$  的单元体, 它到巷道中心的距离为  $r$ , 假设锚杆与围岩之间没有产生相对滑动, 即锚杆与围岩有相同的应变和变形, 则,

$$dP(r) = d\sigma A = E_b A_b d\varepsilon_r^{bm} \quad (14)$$

式中:  $P(r)$  为锚杆轴向力;  $E_b, A_b$  分别为锚杆杆体的弹性模量和横截面面积。

单元体的体积力为:

$$dV = \frac{r}{r_0} e t d r \quad (15)$$

式中:  $e, t$  分别为锚杆的间排距。

将全长锚固锚杆的锚固力简化为轴对称的径向体积力  $K_{r1}$ , 即

$$K_{r1} = \frac{dP(r)}{dV} = \frac{E_b A_b r_0}{e t} \frac{1}{r} \frac{d\varepsilon_r^{bm}}{dr} \quad (16)$$

在预紧力不是很大的情况下, 预应力沿锚杆长度大体呈线性分布。即

$$p_0(r) = p_0 \left( 1 - \frac{r - r_0}{l} \right) \quad (17)$$

式中:  $p_0(r)$  为预紧力  $p_0$  引起的锚杆轴力; 则, 锚杆的预紧力  $p_0$  引起的体积力为:

$$K_{r2} = \frac{dp_0(r)}{dV} = \frac{-\frac{p_0}{l} dr}{\frac{r}{r_0} e t d r} = -\frac{p_0 r_0}{e t l} \frac{1}{r} \quad (18)$$

因此, 施加预紧力  $p_0$  时锚固体等效的体积力  $K_r$  为:  $K_r = K_{r1} + K_{r2}$ 。

在破裂区锚固范围内, 围岩径向应力  $\sigma_r^{bm}$ 、切向应力  $\sigma_\theta^{bm}$  及径向体积力  $K_r$  满足平衡微分方程:

$$\frac{d\sigma_r^{bm}}{dr} + \frac{1}{r} (\sigma_r^{bm} - \sigma_\theta^{bm}) + K_r = 0 \quad (19)$$

研究表明<sup>[16]</sup>, 锚固体残余强度的提高主要是黏聚力增大的结果, 内摩擦角变化不大。因此可忽略锚固后参数  $K_p$  的改变, 满足摩尔-库仑准则, 即

$$\sigma_\theta^{bm} = K_p \sigma_r^{bm} + \sigma_c^{*m} \quad (20)$$

式中,  $\sigma_c^{*m}$  为锚固体的单向抗压残余强度。

联立式 (17) ~ (19), 并利用边界条件, 在  $r = r_0 + l$  处,  $\sigma_r^{bm} = \sigma_r^b$ , 求得

$$\begin{aligned} \sigma_r^{bm} = & \frac{D_6}{K_p + n' + 1} r^{-(n'+2)} - \frac{\sigma_c^{*m}}{K_p - 1} + \frac{D_{14}}{K_p - 1} + D_2 \left( \frac{r}{r_p} \right)^{K_p - 1} + \\ & D_3 \left( \frac{r}{r_b} \right)^{K_p - 1} - \frac{\sigma_c^* - \sigma_c^{*m}}{K_p - 1} \left( \frac{r}{r_0 + l} \right)^{K_p - 1} - \frac{D_6}{K_p + n' + 1} \\ & (r_0 + l)^{-(n'+K_p+1)} r^{K_p - 1} - \frac{D_{14}}{K_p - 1} \left( \frac{r}{r_0 + l} \right)^{K_p - 1} \end{aligned} \quad (21)$$

式中:  $D_6 = \frac{n'E_b\pi D^2 r_0 B}{2et} \cdot \frac{r_p^{m+1}}{r_b^{m-n}} (r_0 + l)^{n'-n}$

$$D_{14} = -\frac{p_0 r_0}{etl}$$

#### 4 锚杆支护后巷道围岩塑性区宽度及破裂范围

在塑性区和破裂区交界处, 即  $r=r_b$  时,  $\sigma_r^b = \sigma_r^p$ , 则塑性区半径与破裂区宽度间的关系为

$$r_p = \left[ \frac{(\sigma_c - \sigma_c^*)(m+1)}{2M_0 B} + 1 \right]^{\frac{1}{m+1}} r_b \quad (22)$$

在  $r=r_0$ ,  $\sigma_r^{bm} = P_i$ , 即可以求得破裂区宽度  $r_b$ 。

#### 5 锚杆预紧力的作用分析

望峰岗井轨道大巷埋深-850 m, 断面形状为直墙半圆拱, 其具体参数为:  $\mu=0.25$ ,  $E=10 \text{ GPa}$ ,  $\sigma_c=10 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_c^*=0.5 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_c^{*m}=0.8 \text{ MPa}$ ,  $\phi=40^\circ$ ,  $P_0=23 \text{ MPa}$ ,  $K_p=3$ ,  $m=3$ ,  $n=1.4$ ,  $n'=1.2$ ,  $r_0=3 \text{ m}$ 。由式 (1) ~ (3) 及 (13) 可以获得预紧力对巷道围岩变形的影响规律, 见图 4。

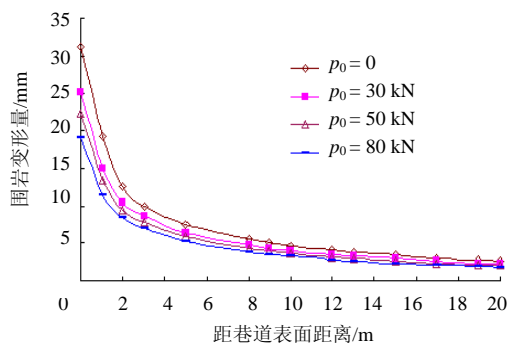


图 4 预紧力对巷道围岩变形影响

Fig.4 Influence of bolt pretightening force on deformation

由式 (4) ~ (9) 及 (21) 可以得到预紧力对巷道围岩应力的影响特征, 如图 5 所示。

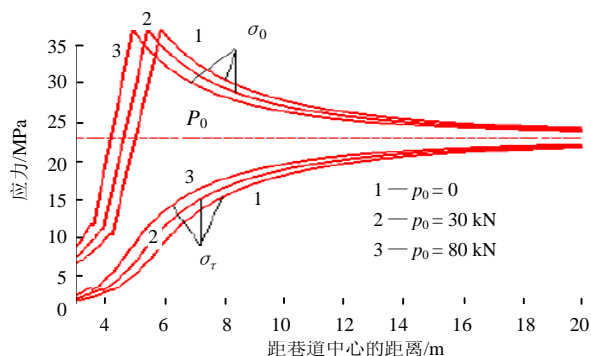


图 5 预紧力对巷道围岩应力影响

Fig.5 Influence of bolt pretightening force on stress

由图 5 可看出, 施加预紧力与无预紧力相比, 巷道围岩的变形及应力有着很大的区别。随着施加预紧力的增加, 巷道围岩的变形大幅度减小, 巷道周边围岩的应力明显增大。

对望峰岗矿井下多条锚杆支护巷道统计发现: 锚杆(索)的预紧力对锚杆安装后的受力有着较大的影响, 如图 6, 7 所示。可以看出, 锚杆安装时, 预紧力越大, 锚杆的受力越大, 且增阻的速度越快。预紧力为 42 kN 的锚杆在安装 8 d 后, 受力就增至 120 kN; 而预紧力为 8 kN 的锚杆, 在安装 25 d 以后才逐渐稳定, 且稳定值很小, 仅为 50 kN 左右。预紧力对锚索受力的影响规律与对锚杆的受力影响规律相同, 即预紧力越大, 锚索的受力就越大。

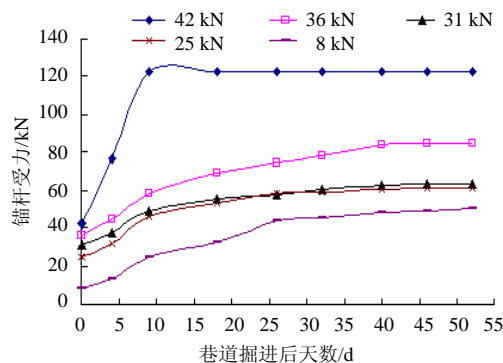


图 6 预紧力对锚杆受力影响

Fig.6 Influence of bolt pretightening on the force of bolts

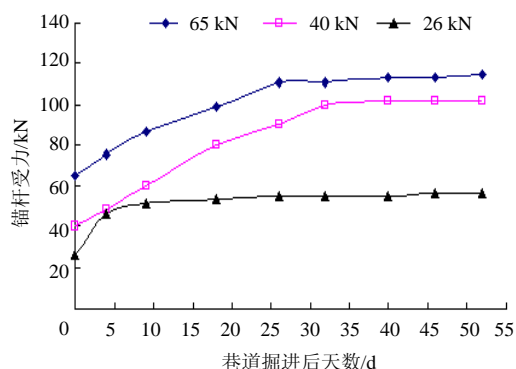


图 7 预紧力对锚索受力影响

Fig.7 Influence of bolt pretightening force on the force of anchor cable

综上所述, 提高预紧力对控制巷道围岩的变形及改善巷道周边围岩的应力状态有积极的作用, 现场施工中要注意对施加锚杆预紧力的要求, 保证其达到设计要求。

## 6 结 论

1) 针对锚杆支护岩石巷道, 将巷道围岩分成

破裂区、塑性区和弹性区,建立了分析锚杆支护巷道围岩力学特征的理想弹塑性应变软化模型,采用Mohr-Coulomb准则,进行非关联弹塑性分析,获得了施加预紧力锚杆支护后巷道围岩位移、应力分布的解析表达式,研究了锚杆预紧力对巷道支护效果的影响关系。

2) 提高预紧力对控制巷道围岩变形及改善巷道周边围岩的应力状态有积极的作用。随施加预紧力的增加,巷道围岩变形大幅度减小,巷道周边围岩的应力明显增大。

### 参考文献:

- [1] 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应用[J]. 煤炭学报, 2007, 23(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, 23(12): 1233-1238.
- [2] 张农, 高明仕. 煤巷高强预应力锚杆支护技术及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 31(5): 524-527.  
ZHANG Nong, GAO Ming-shi. High-strength and pretension bolting support of coal roadway and its application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 31(5): 524-527.
- [3] 柏建彪, 侯朝炯. 深部巷道围岩控制原理与应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 31(2): 145-148.  
BAI Jian-biao, HOU Chao-jiong. Control Principle of surrounding rocks in deep roadway and its application [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 31(2): 145-148.
- [4] 肖亚宁, 马占国, 赵国贞, 等. 沿空巷道三维锚索支护围岩变形规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 187-192.  
XIAO Ya-ning, MA Zhan-guo, ZHAO Guo-zhen, et al. Deformation law of surrounding rock of gob-side entry supported by 3-d anchor-cable support[J]. Journal of Mining & Safety Engineerin, 2011, 28(2): 187-192.
- [5] 翟英达. 锚杆预紧力在巷道围岩中的力学效应[J]. 煤炭学报, 2008, 33(8): 856-859.  
ZHAI Ying-da. The mechanics effect of bolt pretension in roadway surrounding rock[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(8): 856-859.
- [6] 李元, 刘刚, 龙景奎. 深部巷道预应力协同支护数值分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 204-208.  
LI Yuan, LIU Gang, LONG Jing-kui. Numerical analysis of theory of pre-stress synergetic support in deep mine roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineerin, 2011, 28(2): 204-208.
- [7] 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.
- [8] 康红普, 姜铁明, 高富强. 预应力在锚杆支护中的作用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(7): 680-685.  
KANG Hong-pu, JIANG Tie-ming, GAO Fu-qiang. Effect of pretensioned stress to rock bolting[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 680-685.
- [9] 贾金青, 郑卫锋, 陈国周. 预应力锚杆柔性支护技术的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3978-3982.  
JIA Jin-qing, Zheng Wei-feng, Chen Guo-zhou. Numerical analysis of pre-stressed anchor flexible retaining method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3978-3982.
- [10] 付国彬. 巷道围岩破裂范围与位移的新研究[J]. 煤炭学报, 1995, 20(3): 304-310.  
FU Guo-bin. New research on surrounding rock breakage range and displacement of roadway[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(3): 304-310.
- [11] 蒋斌松, 张强, 贺永年, 等. 深部圆形巷道破裂围岩的弹塑性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 982-986.  
JIANG Bin-song, ZHANG Qiang, HE Yong-nian, et al. Elastoplastic analysis of cracked surrounding rocks in deep circular openings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 982-986.
- [12] SHARAN S K. Analytical solutions for stresses and displacements around a circular opening in a generalized Hoek-Brown rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008,45(1): 78-85.
- [13] 汤伯森. 弹塑性围岩砂浆锚杆支护问题的估算法[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(6): 42-51.  
TANG Bo-sen. The estimation of grouting rod support strength in Elasto-plastic surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 13(6): 42-51.
- [14] LI C, STILLBORG B. Analytical models for rock bolts[J]. International Journal of Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36: 1013-1029
- [15] YUE CAI, TETSURO ESAKI, YU Jing-Jiang. A rock bolt and rock mass interaction model[J]. International Journal of Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41: 1055-1067
- [16] 侯朝炯, 勾攀峰. 巷道锚杆支护围岩强度强化机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 342-345.  
HOU Chao-jiong, Gou Pan-feng. Mechanism study on strength enhancement for the rocks surrounding roadway supported by bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 342-345.