

文章编号: 1673-3363-(2013)02-0188-06

全长锚固预应力锚杆杆体受力特征分析

李冲¹, 徐金海¹, 李明²

(1. 中国矿业大学矿业工程学院, 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要 采用理论分析、现场实测等研究方法, 分析了锚杆杆体轴应力、剪应力与预紧力的关系以及杆体轴应力与剪应力的分布规律。结果表明: 锚杆轴应力随预应力的增大而增加, 在锚杆全长方向上呈曲线变化的, 从锚杆尾部到锚杆端头方向, 轴应力先增加后减小, 在中性点处轴应力最大, 轴应力最大值位置向锚杆尾端移动; 随锚杆预应力增加, 锚杆杆体剪应力在巷道表面与中性点位置一段减小, 在中性点与锚杆端头一段增加, 中性点处锚杆剪应力为零, 中性点向锚杆尾部移动。全长锚固锚杆预紧力不是越大越好, 而是有个合理的范围, 预紧力大小要与锚杆支护系统强度相匹配。

关键词 预应力锚杆; 全长预应力锚固; 锚杆轴应力; 锚杆剪应力

中图分类号 TD 353

文献标志码 A

The mechanical characteristics analysis of fully anchored pre-stressed bolts in coal mines

LI Chong¹, XU Jin-hai¹, LI Ming²

(1. School of Mines, Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining of Ministry of Education, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering,

China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract Theoretical analysis, field measurements, and other methods were used to analyze the relationship between axial stress, shear stress, and pre-load on the bolts and the distribution of the axial and shear stresses. The results show that the axial stress increases as the pre-stress increases. The axial stress shows a curve changing with the pre-stress upon moving from the bolt tail to its head, that is, the axial stress first increases and then decreases along the bolt and at the neutral point the axial stress reaches a maximum value. The maximum value of the axial stress, moves toward the bolt tail end as the pre-stress increases. The shear stress decreases between the roadway surface and the neutral point and then increases between that point and bolt end. The shear stress equals zero at the neutral point. The proper pre-load for the fully anchored bolt is not "the bigger the better". There is a reasonable range for the pre-load that should match the bolt support system strength.

Key words pre-stressed bolt; full-length pre-stressed anchorage; bolt axial stress; bolt shear stress

收稿日期: 2011-11-20

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程项目; 煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究项目(SKLCRSM11X02)

作者简介: 李冲(1980-), 男, 安徽省灵璧县人, 讲师, 博士, 从事采矿工程技术、井巷支护与岩石力学方面的研究。

E-mail: lichongck@126.com

Tel: 13952181923

我国很多矿区锚杆支护率达到 60%, 有些矿区锚杆支护率已超过 90%, 甚至达到 100%。使我国煤矿巷道支护技术发展到一个新的阶段。美国、澳大利亚、英国等国家对锚杆支护技术进行了比较全面的研究, 取得良好的支护效果, 锚杆支护率达 90% 以上^[1-3]。锚杆锚固方式有端锚、加长锚固和全长锚固等锚固方式, 为了提高支护效果, 减少初期的巷道离层、变形, 大多数端锚和加长锚固锚杆都施加预紧力^[4-5]。全长锚固锚杆由于施工工艺复杂, 施加预紧力难度大, 一般不加预紧力, 即使施加预紧力也是在自由段施加预紧力, 不能实现全长预应力锚固。但随着锚杆支护技术与理论的进一步发展, 加上煤矿开采强度的大幅度增加, 以及矿井向深度及广度拓展, 出现了高地应力巷道、极破碎围岩巷道、特大断面、特大跨度巷道、受强烈采动影响的巷道及沿空留巷等复杂困难巷道, 对巷道支护技术提出了更高、更苛刻的要求, 采用端锚或加长锚固锚杆支护效果差, 难以控制此类巷道围岩有害变形^[6-8]。而全长预应力锚固技术既具有端锚锚杆预应力扩散范围大的优点, 又具有全长锚固锚杆对围岩变形和离层敏感的优点, 其支护刚度高于端锚或加长锚固锚杆支护刚度, 能够防止巷道围岩的变形^[9-11]。但安装的时候, 必须先施加预紧力, 锚固剂后固化。如超快速固化与慢速固化锚固剂搭配, 锚杆端部采用超快速固化锚固剂, 尾部采用慢速固化锚固剂, 这样才能保证预紧力可以加上, 可以显著提锚杆支护效果, 有必要研究全长锚固预应力锚杆受力特征。国内外大量专家学者对非预应力全长锚固锚杆及预应力端锚锚杆受力特征研究较多, 也取得了一定的研究成果^[12-14]。端锚及加长锚固方式, 除锚固端外, 锚杆杆体所受拉力, 沿杆体轴向是均匀分布的, 其预紧力扩散效果较好, 但杆体与围岩之间有空隙, 导致杆体受力对围岩变形和离层不敏感。由于锚杆在煤岩介质受力的复杂性, 使得锚固技术和理论的发展比较缓慢, 许多工程问题的设计和计算仍然停留在经验上。加之全长锚固预应力锚杆杆体受力较复杂, 煤矿井下全长锚固预应力锚杆杆体受力特征的研究甚少。因此, 本文通过建立力学模型, 分析了全长锚固预应力锚杆受力特征。为全长锚固预应力锚杆的力学分析和支护设计提供了理论依据。

1 全长锚固预应力锚杆支护力学模型

锚杆受力与围岩变形、围岩压力、围岩强度、

锚杆支护系统材料、尺寸、预应力大小等有关系。根据锚杆-围岩相互作用原理, 建立如图 1 所示的全长锚固预应力锚杆杆体受力计算模型。

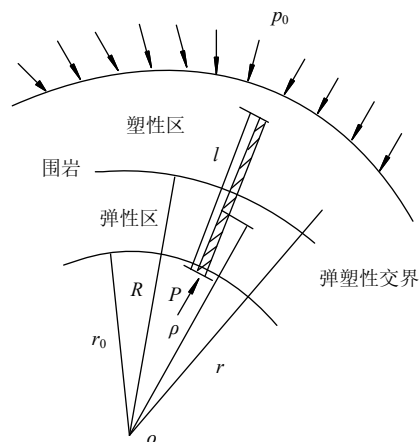


图1 全长锚固预应力锚杆支护杆体受力计算模型

Fig.1 A mechanical model of a fully anchored pre-stressed bolt

图 1 中, r_0 为开挖巷道半径, R 为围岩塑性区半径, ρ 为巷道中心到中性点距离, l 为锚杆长度, r 为巷道中任意一点的位置, P 为锚杆对围岩所施加的预紧力, p_0 为围岩压力。

图 2 是作用在围岩中锚杆杆体受力状态图, P' 为由于预紧力作用围岩对锚杆的反作用力, $P=P'$, T 为围岩对锚杆的沿锚杆轴向的切向力, 即锚杆杆体剪力, 它是围岩与锚杆相对位移的函数。

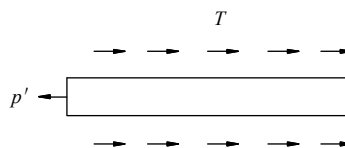


图2 锚杆杆体受力状态

Fig.2 The stress status along the bolt body

2 锚杆剪应力与轴应力

2.1 锚杆受力的基本力学表达式

根据图 2 中锚杆受力状态, 结合图 1 中的位置坐标, 对锚杆进行受力分析可得:

$$\int_{r_0}^{r_0+l} T dr = P \quad (1)$$

切向力 T 主要取决于围岩的变形, 其大小与锚杆和围岩的相对位移成正比, 即

$$T = K \Delta u \quad (2)$$

式中: K 为围岩的剪切刚度, 其大小主要取决于围岩的状态, 在塑性状态以及弹性状态下围岩的剪切刚度不同, 可以近似的认为 $K = G \pi d$, G 为岩石的

剪切模量; Δu 表示围岩与锚杆之间的相对位移。文中弹性状态和塑性状态 K 分别用 K_1 , K_2 表示。

根据中性点理论, 中性点处锚杆表面的切向力为零, 所以锚杆的整体位移可用中性点处围岩的位移表示, 那么, 锚杆中任意一点与围岩的的相对位移可以表示为:

$$\Delta u = u_\rho - u_r \quad (3)$$

将式(2), (3)代入式(1)得到:

$$\int_{r_0}^{r_0+l} K(u_\rho - u_r) dr = P \quad (4)$$

2.2 巷道围岩表面位移

根据弹塑性力学, 巷道采用锚杆支护, 在锚杆作用范围内, 巷道围岩状态依次为弹性、弹塑性以及塑性, 围岩塑性区随着巷道掘进时间的增加, 慢慢向围岩深部扩展, 巷道围岩表面位移也不断增加。考虑巷道开挖之后围岩性质的变化过程, 在分析中考虑弹性、弹塑性、塑性等 3 种情况。

1) 弹性状态

锚杆作用范围内围岩体完全处在弹性状态是在巷道开挖后的阶段几乎瞬间存在的, 但是在坚硬围岩中, 巷道开挖一段时间后, 可认为巷道围岩体是弹性状态, 依据弹性力学可知, 巷道围岩表面位移表达式为:

$$u = \frac{1+\mu}{E} p_0 \frac{r_0^2}{r} = A_0 \frac{1}{r} \quad (5)$$

$$A_0 = \frac{1+\mu}{E} p_0 r_0^2 \quad (6)$$

式中: E 为巷道围岩弹性模量; μ 为泊松比。

2) 弹塑性状态

巷道开挖一段时间后, 锚杆作用的围岩体处在弹塑性状态下, 根据弹性力学以及弹塑性力学, 这种状态下, 巷道围岩位移表达式为:

$$u = A_0 \frac{1}{r}$$

式中 A_0 的表达式在岩石的弹性状态和塑性状态下表达式有所不同。其中, 围岩弹性状态下, A_0 的表达式为

$$A_1 = \frac{1+\mu}{E} R^2 (p_0 - \sigma_R) \quad (7)$$

式中: R 为围岩塑性区半径; σ_R 表示弹塑性界面处的径向应力。

$$R = r_0 \left[\frac{p_0 + C \cot \varphi}{C \cot \varphi} (1 - \sin \varphi) \right]^{\frac{1-\sin \varphi}{2 \sin \varphi}}$$

$$\sigma_R = C \cot \varphi \left[\left(\frac{R}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1-\sin \varphi}} - 1 \right]$$

塑性状态下, A_0 的表达式为:

$$A_2 = \frac{1+\mu}{E} R^2 (p_0 \sin \varphi + C \cos \varphi) \quad (8)$$

式中: C , φ 表示岩石的内聚力和内摩擦角。

3) 塑性状态

随时间推移, 巷道开挖一段时间之后, 锚杆作用范围的围岩全部进入塑性状态, 那么围岩位移表达式变为弹塑性状态中塑性状态的表达式, 即:

$$A_0 = \frac{1+\mu}{E} R^2 (p_0 \sin \varphi + C \cos \varphi) \quad (9)$$

需要说明的是, 在不考虑岩石流变的情况下, 即不以时间的变化作为岩石弹塑性状态变化的依据, 只是根据瞬时状态来衡量锚杆作用范围的围岩状态, 那么弹塑性、塑性状态塑性区的范围主要取决于岩石固有的力学参数 E , μ , C , φ 。

2.3 全长锚固预应力锚杆剪应力

根据式(4)~(9), 可以分别求解各种应力状态下中性点的位置。

1) 弹性状态

$$\begin{aligned} \int_{r_0}^{r_0+l} T dr &= \int_{r_0}^{r_0+l} K_1 (u_\rho - u_r) dr = \\ &= K_1 A_0 \left(\frac{l}{\rho} - \ln \frac{r_0+l}{r_0} \right) = P \end{aligned} \quad (10)$$

求解得到:

$$\rho = \frac{K_1 A_0 l}{P + K_1 A_0 \ln \frac{r_0+l}{r_0}} \quad (11)$$

2) 弹塑性状态

锚杆所受剪力是由塑性围岩与弹性围岩两部分锚杆剪力组成, 因此可以计算为:

$$\begin{aligned} \int_{r_0}^{r_0+l} T dr &= \int_{r_0}^R K_2 (u_\rho - u_r) dr + \int_R^{r_0+l} K_1 (u_\rho - u_r) dr = \\ &= \int_{r_0}^R K_2 A_2 \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{r} \right) dr + \int_R^{r_0+l} K_1 A_1 \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{r} \right) dr = \\ &= K_2 A_2 \left(\frac{R-r_0}{\rho} - \ln \frac{R}{r_0} \right) + K_1 A_1 \left(\frac{r_0+l-R}{\rho} - \ln \frac{r_0+l}{R} \right) = \\ &= \frac{1}{\rho} [K_2 A_2 (R-r_0) + K_1 A_1 (r_0+l-R)] - \\ &= \left(K_2 A_2 \ln \frac{R}{r_0} + K_1 A_1 \ln \frac{r_0+l}{R} \right) = P \end{aligned} \quad (12)$$

求解得到:

$$\rho = \frac{[K_2 A_2 (R - r_0) + K_1 A_1 (r_0 + l - R)]}{P + \left(K_2 A_2 \ln \frac{R}{r_0} + K_1 A_1 \ln \frac{r_0 + l}{R} \right)} \quad (13)$$

3) 塑性状态

$$\int_{r_0}^{r_0+l} T dr = \int_{r_0}^{r_0+l} K_2 (u_\rho - u_r) dr = \int_{r_0}^{r_0+l} K_2 A_2 \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{r} \right) dr =$$

$$K_2 A_2 \left(\frac{l}{\rho} - \ln \frac{r_0 + l}{r_0} \right) = P \quad (14)$$

求解得到:

$$\rho = \frac{K_2 A_2}{P + K_2 A_2 \ln \frac{r_0 + l}{r_0}} \quad (15)$$

以上3种状态下, 中性点距巷道中心距离为:

$$\rho = \begin{cases} \frac{K_1 A_0 l}{P + K_1 A_0 \ln \frac{r_0 + l}{r_0}} & (\text{弹性状态}) \\ \frac{[K_2 A_2 (R - r_0) + K_1 A_1 (r_0 + l - R)]}{P + \left(K_2 A_2 \ln \frac{R}{r_0} + K_1 A_1 \ln \frac{r_0 + l}{R} \right)} & (\text{弹塑性状态}) \\ \frac{K_2 A_2}{P + K_2 A_2 \ln \frac{r_0 + l}{r_0}} & (\text{塑性状态}) \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)可看出, 无论锚杆作用范围内的围岩处于怎样的状态, 随着预紧力 P 的增大, ρ 逐渐减小, 即, 锚杆的受拉范围逐渐增大, 岩体受压区域增大。但是, P 也是有范围的, 即不能大于锚杆的抗拉屈服极限, 同时还必须满足 $\rho \geq r_0$ 。

将式(5)~(9), (16)代入式(2)可得围岩不同状态下锚杆切向力, 即可得到 T 。取锚杆上一段微元, 进行受力分析, 如图3所示。将切向力 T 平均分布到锚杆上, 得到切向应力, 即剪应力:

$$\tau = T / \pi d$$

式中 d 为锚杆直径。

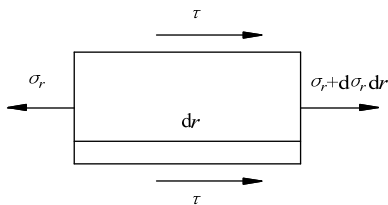


图3 锚杆单元体受力模型

Fig.3 Bolt unit stress body model

2.4 全长锚固预应力锚杆轴应力

由图3, 根据受力平衡得到

$$\frac{\pi d^2}{4} \left[\left(\sigma_r + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} dr \right) - \sigma_r \right] + \tau \pi d dr = 0 \quad (17)$$

求解式(17)得到:

$$d\sigma_r = -\frac{4}{d} \tau dr \quad (18)$$

对式(18)进行积分

$$\sigma_r = -\frac{4K A_0}{\pi d^2} \int \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{r} \right) dr$$

$$= -\frac{4K A_0}{\pi d^2} \left(\frac{r}{\rho} - \ln r + C \right) \quad (19)$$

根据边界条件, 在孔口 $r = a$ 处, $\sigma_r = \frac{4P}{\pi d^2}$,

$$C = -\frac{P}{EA_0} - \frac{a}{\rho} + \ln a \quad (20)$$

将式(20)代入式(19)

$$\sigma_r = \frac{4K A_0}{\pi d^2} \left(\frac{r_0 - r}{\rho} + \ln \frac{r}{r_0} + \frac{P}{EA_0} \right) \quad (21)$$

在最大拉应力处, $\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = 0$, 从而得到当 $r = \rho$

时, σ_r 有最大值, 即

$$\sigma_{r\max} = \frac{4K A_0}{\pi d^2} \left(\frac{r_0 - \rho}{\rho} + \ln \frac{\rho}{r_0} + \frac{P}{EA_0} \right) \quad (22)$$

将式(16)代入式(21), (22)就可以得到轴向应力以及最大轴向应力表达式。将式(21), (22)乘以 $\pi d^2/4$ 就可以得到轴力以及最大轴力的表达式。

3 全长锚固锚杆预紧力与杆体受力的关系分析

3.1 工程条件

某矿回采巷道围岩的内聚力 $c = 2$ MPa, 泊松比比 $\mu = 0.25$, 弹性区 $K_1 = 10$ GPa, 塑性区 $K_2 = 5$ GPa, 巷道半径 $r_0 = 3$ m, 锚杆长度 $l = 2.4$ m, 锚杆直径 $d = 22$ m, 内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$, 围岩压力 $p_0 = 10$ GPa。

3.2 锚杆预紧力与杆体轴应力的关系

锚杆杆体轴应力随着预应力的增加而增大, 当杆体轴应力达到杆体极限抗拉强度时, 施加的预紧力为极限预紧力, 若预紧力大于极限预紧力, 锚杆杆体轴应力超过杆体极限抗拉强度, 锚杆就会被拉断。因此, 锚杆预紧力不是越大越好, 而是应该有一合理范围, 预紧力大小要与锚杆支护体系相匹配, 过高的预紧力, 可能造成锚杆容易扭曲、甚至屈服变形、被拉断、托盘被拉坏等问题, 造成锚杆支护系统失效, 过低的预紧力, 不能实现真正的主动力支护, 不能及时抑制围岩离层与滑动。如图4。

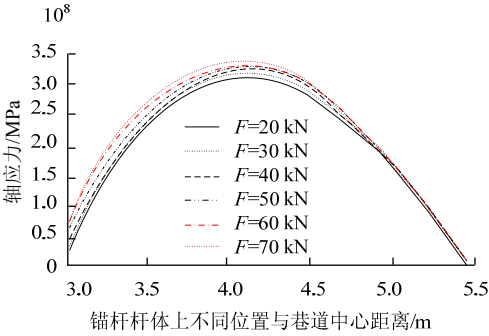


图 4 不同预紧力锚杆不同位置轴应力大小图
Fig. 4 Axial stress at different locations for different pre-loads

锚杆杆体轴应力在杆体从锚杆尾部向端头沿锚杆杆体全长呈曲线变化的,轴应力是先增大后减小,锚杆轴应力的最大值,不在锚杆端头和尾端部位,而处在杆体中间部位(中性点处),随预紧力的增加,轴应力最大值的位置向锚杆尾端移动,锚杆尾端轴应力增大。锚杆最大轴应力不仅取决于围岩的性质,而且取决于锚杆长度与巷道断面之比。锚杆最大轴应力不应超过锚杆杆体材料的允许抗拉强度,如表 1, 2 所示。

表 1 不同预紧力锚杆轴应力最大值

Table 1 Location and magnitude of bolt maximum stress for different pre-loads

| 预紧力/kN | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ρ/m | 4.061 | 4.05 | 5.039 | 4.029 | 4.018 | 4.007 |
| 轴应力/MPa | 306.9 | 311.6 | 316.4 | 321.3 | 326.3 | 331.4 |

表 2 不同预紧力锚杆尾端轴应力

Table 2 Bolt tail-end axial stress for different pre-loads

| 预紧力/kN | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 轴应力/MPa | 22.03 | 33.04 | 44.06 | 55.07 | 66.09 | 77.1 |

3.3 锚杆预紧力与杆体剪应力的关系

全长锚固预应力锚杆是杆体与围岩体间锚固剂的黏结力阻止围岩变形的。在锚杆靠近巷道表面一段,围岩要向巷道内移动,锚杆阻止围岩移动,锚杆表面受到指向巷道表面的剪应力;在锚杆远离巷道表面的一段,围岩阻止锚杆移动,锚杆表面受到背向巷道表面的剪应力,在锚杆全长上必有一个中性点,在该处锚杆表面剪应力为零。如图 5 所示。

随预紧力的增大,锚杆杆体剪应力先减小后大,在中性点处,轴力达到最大值,而剪力改变方向,此处剪力最小,为零;同时,随着锚杆预紧力增大,中性点位置逐渐向尾部移动。如表 3, 4。

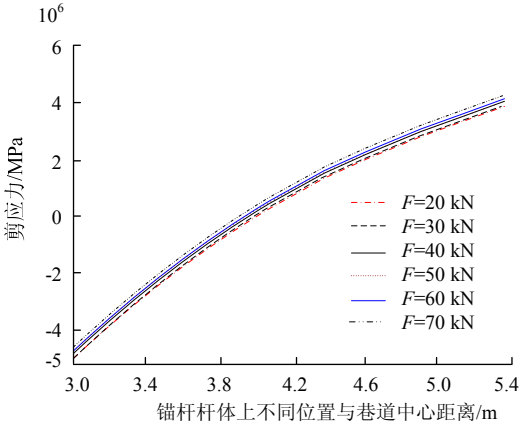


图 5 不同预紧力锚杆不同位置剪应力大小图
Fig.5 Shear stress at different locations for different pre-loads

表 3 不同预紧力锚杆尾端剪应力

Table 3 Tail- end shear stress for different pre-loads

| 预紧力/kN | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| 剪应力/MPa | -5.061 | -4.989 | -4.916 | -4.844 | -4.772 | -4.7 |

表 4 不同预紧力锚杆端头剪应力

Table 4 Head-end shear stress for different pre-loads

| 预紧力/kN | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
|---------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 剪应力/MPa | 3.661 | 3.733 | 3.805 | 3.878 | 3.95 | 4.022 |

4 结 论

1) 根据锚杆-围岩相互作用原理,建立了全长锚固预应力锚杆力学计算模型,推导出全长锚固预应力锚杆轴应力与剪应力的计算式。锚杆杆体轴应力与剪应力与围岩条件、巷道断面、锚杆自身性质以及施加预紧力大小有关系。

2) 随全长锚固锚杆预紧力增大,锚杆杆体轴应力增加,在锚杆杆体全长方向上呈曲线变化的,从锚杆尾部向锚杆端头方向,轴应力先增加后减小,在中性点处,轴应力最大,轴应力最大值位置向锚杆尾端移动;随锚杆预紧力增加,锚杆杆体剪应力在巷道表面与中性点位置一段减小,在中性点与锚杆端头一段增加,中性点处锚杆杆体剪应力改变方向,且中性点处锚杆杆体剪应力为零,剪应力为零的位置向锚杆尾部移动。

3) 全长锚固锚杆预紧力不是越大越好,而是有个合理的范围,预紧力大小要与锚杆支护系统强度相匹配;过高的预紧力,可能造成锚杆容易扭曲、甚至屈服变形、被拉断、托盘被拉坏等问题,造成锚杆支护失效,过低的预紧力,不能及时抑制围岩离层与滑动。

参考文献:

- [1] 何满潮, 袁和生, 靖洪文, 等. 中国煤矿锚杆支护理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 126-129.
- [2] 康红普, 王金华. 煤巷锚杆支护理论与实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007: 28-35.
- [3] 杨双锁, 曹建平. 锚杆受力演变机理及其与合理锚固长度的相关性[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 1-6.
YANG Shuang-suo, CAO Jian-ping. Evolution mechanism of anchoring stress and its correlation with anchoring length[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 1-6.
- [4] SUN Xiao-ming, CAI Feng, YANG Jun, et al. Numerical simulation of the effect of coupling support of bolt-mesh-anchor in deep tunnel[J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(3): 352-357.
- [5] LIU H Y, SMALL J C, CARTER J P, et al. Effects of tunnelling on existing support systems of perpendicularly crossing tunnels[J]. Computers and Geotechnics 2009, 36: 880-894.
- [6] 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.
- [7] 范明建. 锚杆预应力与巷道支护效果的关系研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2007.
- [8] 杨双锁, 康立勋. 锚杆作用机理及不同锚固方式的力学特征[J]. 太原理工大学学报, 2003, 34(5): 540-543
YANG Shuang-suo, KANG Li-xun. Study on the principle of bolt action and the feature of variable anchorage[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2003, 34(5): 540-543.
- [9] LI Chong, XU Jin-hai, FU Chun-sheng, et al. Mechanism and practice of rock control in deep large span cut holes[J]. Mining Science and Technology, 2011, 21(6): 891-896.
- [10] 王强, 吴拥政. 煤矿井下锚杆预紧力控制研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 29-32.
WANG Qiang, WU Yong-zheng. Study on bolt pretension control in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(1): 29-32.
- [11] 康红普, 王金华, 林健. 煤矿巷道锚杆支护应用实例分析[J]. 煤炭学报, 2010, 29(4): 649-664.
KANG Hong-pu, WANG Jin-hua, LIN Jian. Case studies of rock bolting in coal mine roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 29(4): 649-664.
- [12] 尤春安. 全长黏结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 339-341.
YOU chun-an. Mechanical Analysis of Wholly Grouted Anchor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 339-341.
- [13] 廖小平, 王浩, 安孟康, 等. 全长黏结型预应力锚杆的数值分析与现场测试[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 3743-3748.
LIAO Xiao-ping, WANG Hao, AN Meng-kang, et al. Numerical analysis and field test on full grouted prestressed anchor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 3743-3748.
- [14] 文志杰, 石永奎, 崔增娣, 等. 全长黏结型预应力锚杆受力特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 177-181.
WEN Zhi-jie, SHI Yong-kui, CUI Zeng-di, et al. Study of stress features of fully grouted prestressed anchors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 177-181.

本刊声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我社上述声明。