

文章编号:0253-9993(2012)12-1982-05

锚杆初始支护阻力的计算及预测

王 成¹,杜泽生²,李志兵³

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院,河南 焦作 454003;2. 煤炭科学研究总院 安全装备技术研究分院,北京 100013;3. 中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116)

摘 要:为了便于计算和预测锚杆支护的初始支护阻力,基于锚杆及时支护时锚固区围岩处于弹塑性状态的假设,建立锚杆受力和安装力学模型,分析研究初始支护阻力与预紧力矩之间的关系,得出锚杆支护螺母、托盘两种接触类型的初始支护阻力的理论解,同时采用自制的“锚杆锚固传递及衰减规律”模拟试验台对初始支护阻力进行验证。研究结果表明:锚杆支护材质、规格及支护间排距相同时,其初始支护阻力与预紧力矩呈线性关系;预紧力矩在 0~300 N·m 时,初始支护阻力与预紧力矩间有准确的数学表达式,采用预紧力矩能够量化和预测初始支护阻力。

关键词:锚杆支护;支护阻力;预紧力;预紧力矩

中图分类号:TD353.6 **文献标志码:**A

Calculation and prediction of initial support pressure in bolt support

WANG Cheng¹, DU Ze-sheng², LI Zhi-bing³

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Mining Safety Equipment and Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to get and predict initial support pressure, mechanical models of bolt's stress and bolt's installation were established, based on the hypothesis on surrounding rock of immediate bolt support in elastic-plastic status. The relationship between initial support pressure and tightening torque was analyzed, and theoretical solutions to initial support pressure were obtained for two contacts of pallet and nut. Meanwhile, verification research was carried out by "Bolt Force Transfer and Attenuating Test System". The results show that there is a linear relationship between initial support pressure and tightening torque under the same condition of bolt's material quality, specification, row & line space; when the tightening torque is among 0-300 N·m, the equations of initial support pressure and tightening torque is right; initial support pressure can be quantized and predicted by tightening torque.

Key words: bolt support; support pressure; pre-tightening force; tightening torque

随着煤矿开采强度大幅度提高、开采深度以 8~12 m/a 快速向深部延伸^[1-2], 矿井进入深部开采后, 出现了高地应力、强采动、极破碎围岩等软岩巷道, 对巷道支护强度提出更高的要求。支护阻力即支护强度对巷道稳定有着关键的作用^[3-4]。大量的研究表明, 当锚杆支护的初始支护阻力小于 0.1 MPa 时, 松散变形随初始支护阻力的增大下降曲率很大; 初始支护阻力介于 0.1~0.3 MPa 时, 松散变形随初始支护阻力的增大下降曲率相对减小; 而当初始支护阻力超

过 0.3 MPa 时, 松散变形已很小^[5-9]。在锚杆支护工程实践中, 锚杆高支护阻力主要通过扭矩螺母施加高预紧力实现, 已有的成果大多集中在锚杆预紧扭矩与预紧力方面, 且以实验室测试为主^[10-11], 未见对支护阻力的实际量化的相关研究, 锚杆支护阻力的计算及预测一直缺乏理论指导, 且难以检测^[12-13]。因此, 建立锚杆初始支护阻力与预紧力矩的对应关系、形成易于检测支护阻力的方法成为很有实用价值的研究, 对提高锚杆支护参数的合理性和支护系统的可靠性具

有重要的指导意义。

1 初期支护阻力的扭矩弧度函数

1.1 螺线线各参数之间的几何关系

在锚杆螺线段截取一部分,如图 1 所示,设螺线线环平面直径为 d ,其升角为 ψ , \widehat{AC} 为过起点 A 的任意螺线段,在 \widehat{AC} 上任取一点 $F(\widehat{AF}=l')$,记 φ 为螺线线 \widehat{AF} 对应的平面转角(扭矩所转弧度)。过 F 向底环线引垂线 $FG(FG=h$,为拧进螺母量),垂足为 G 。由图 1 可得

$$h = \frac{d\varphi \tan \psi}{2} = l' \sin \psi \quad (1)$$

由式(1)可得

$$\varphi = \frac{2l' \cos \psi}{d} \quad (2)$$

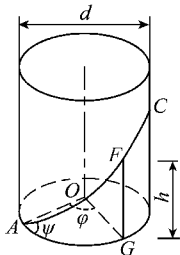


图 1 螺线几何关系

Fig. 1 Geometrical relationship of helical

1.2 初期支护阻力的扭矩弧度函数表达式

根据锚杆实际工况,建立锚杆受力学模型,如图 2 所示,其中 τ_{1x} 为锚固剂的黏结力, T' 为托盘对螺母的作用力(即预紧力), T' 与托锚力 T 等值反向。

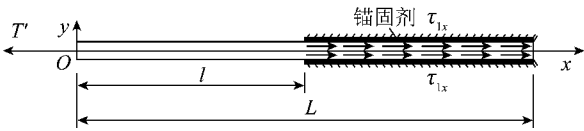


图 2 树脂锚杆受力学模型

Fig. 2 Model of bolt force

锚杆体任意一点 x 处锚固剂对锚杆的黏结力 τ_{1x} [14] 为

$$\tau_{1x} = \tau_{2x} \begin{cases} Ce^{-\frac{x-l}{(D-D_2)}} \sqrt{BK/E}, & l \leq x \leq L \\ 0, & 0 \leq x < l \end{cases} \quad (3)$$

式中, τ_{2x} 为锚固剂对围岩径向切应力; l 为围岩内锚杆体自由段长度; L 为围岩内锚杆体长度; D 为锚杆施工钻孔直径; D_2 为锚杆直径; B 为杆体和钻孔之间的间隙宽, $B = (D - D_2)/2$; $K = K_1 K_2 / (K_2 + K_1)$, 其中 K_1, K_2 分别为锚固剂剪切刚度和围岩的剪切刚度; E 为锚杆体的弹性模量; C 为积分常数。

由锚杆轴向受力平衡可得

$$\tau_{1x} = \tau_{2x} = \begin{cases} \frac{T e^{-(x-l)/(D-D_2)}}{\pi(D-D_2)D_2[1 - e^{-(L-l)/(D-D_2)}]}, & l \leq x \leq L \\ 0, & 0 \leq x < l \end{cases} \quad (4)$$

设螺母紧贴托盘后,拧进螺母量 h 由围岩变形 h_1 和锚杆拉伸变形 h_2 组成(忽略托盘压缩变形),即

$$h = h_1 + h_2 \quad (5)$$

巷道开挖后,及时安装新型“三高”锚杆,给锚杆施加高预紧力矩时,使锚杆进入高增阻急增荷的工作状况 [15-16],可认为巷道围岩只有弹塑性变形,为便于计算,将围岩压缩视为弹性压缩。设托盘控制范围内围岩受均布载荷,由受力平衡方程和应力边界条件,得围岩径向应变 ε_{px} 为

$$\varepsilon_{px} = \frac{4(T - \int_0^x \pi D_2 \tau_{2x} dx)}{E_1(4b^2 - \pi D^2)} \quad (6)$$

式中, E_1 为岩石的弹性模量; b 为托板宽度。

围岩弹性变形为

$$h_1 = \int_0^L \varepsilon_{px} dx$$

将式(4)和式(6)代入上式并积分得

$$h_1 = 4T \left\{ \frac{L}{E_1(4b^2 - \pi D^2)} - \frac{D(L-l)}{E_1 D_2 (4b^2 - \pi D^2) [e^{-(L-l)/(D-D_2)} - 1]} + \frac{D(D-D_2)}{E_1 D_2 (4b^2 - \pi D^2)} \right\} \quad (7)$$

锚杆拉伸变形为

$$h_2 = \int \varepsilon_x dx = \frac{4}{E\pi D_2^2} \int \tau_{1x} \pi D_2 dx$$

将式(4)代入上式可得

$$h_2 = 4T \left[\frac{(D-D_2+L-l)e^{-(L-l)/(D-D_2)} + D_2 - D}{e^{-(L-l)/(D-D_2)} - 1} + \frac{l}{E\pi D_2^2} \right] \quad (8)$$

锚杆对巷道的支护阻力是通过向围岩提供径向应力实现的,故在安装锚杆初期可近似认为是托锚力使围岩由平面应力状态变为三向应力状态,并假设提供均布初期支护阻力 p ,则

$$p = \frac{T}{ij} \quad (9)$$

式中, i, j 分别为锚杆的间排距。

将式(1),(7)和(8)代入式(5)中并结合式(9)

得

$$p = \frac{D \tan \alpha}{8ij \left\{ \frac{E_1 D_2 (4b^2 - \pi D^2) (L-l) - D(L-l)}{E_1 D_2 (4b^2 - \pi D^2) [e^{-(L-l)/(D-D_2)} - 1]} + \frac{LD_2 + D^2 - DD_2}{E_1 D_2 (4b^2 - \pi D^2)} + (D - D_2 + L - l) + \frac{l}{E \pi D_2^2} \right\}} \varphi$$

$$\text{令: } \lambda = \frac{D \tan \alpha}{8ij \left\{ \frac{E_1 D_2 (4b^2 - \pi D^2) (L-l) - D(L-l)}{E_1 D_2 (4b^2 - \pi D^2) [e^{-(L-l)/(D-D_2)} - 1]} + \frac{LD_2 + D^2 - DD_2}{E_1 D_2 (4b^2 - \pi D^2)} + (D - D_2 + L - l) + \frac{l}{E \pi D_2^2} \right\}}$$

故

$$p = \lambda \varphi \quad (10)$$

由此可知,在巷道围岩性质、锚杆材质规格及锚杆支护间排距确定的情况下,λ 是定值,初期支护阻力 p 与预紧力矩所转弧度 φ 成线性关系。

2 初始支护阻力的理论解

由于锚杆杆体、螺母和托盘的弹性模量远大于围岩的弹性模量,视为刚体,它们变形所消耗的功可忽略不计^[17-18]。因此,根据能量守恒原理,螺母扭矩 M 所做功 E(M) 等于围岩被压缩储存的能量 E(T)、螺丝扣间摩擦做功 E(f_s)、螺母与托盘摩擦发热所消耗的功 E(f_i)之和,故锚杆安装力学模型如图 3 所示。

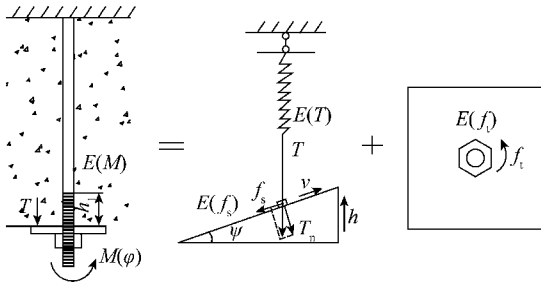


图 3 锚杆安装力学模型

Fig. 3 Mechanical model for installation of bolt 扭矩做功关系的表达式可简化为

$$E(M) = E(T) + E(f_s) + E(f_i) \quad (11)$$

2.1 E(T) 关系表达式

根据图 3,巷道围岩被弹性压缩所储存的能量等于托盘对围岩施力所做的功,即

$$E(T) = \int_0^h T dh = \int_0^h ij \lambda \varphi dh \quad (12)$$

结合式(1)并经计算积分得

$$E(T) = \frac{1}{4} ij \lambda d \varphi^2 \tan \alpha \quad (13)$$

2.2 E(f_s) 关系表达式

如图 3,设丝扣间摩擦系数为 k,则丝扣间摩擦做功 E(f_s) = ∫₀^l kT cos α dl', 将式(10)和式(2)代入即得, E(f_s) = $\frac{ijk\lambda l'^2 \cos^2 \alpha}{d}$, 结合式(1)得

$$E(f_s) = \frac{1}{4} ij \lambda k d \varphi^2 \quad (14)$$

2.3 E(f_i) 关系表达式

锚杆螺母与托盘有多种接触类型,以平面接触型和环线接触型为常见类型(图 4)。

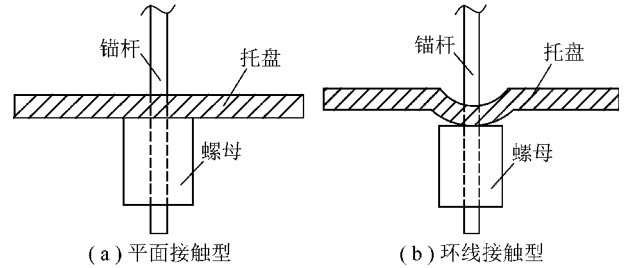


图 4 锚杆螺母与托盘常见的接触类型

Fig. 4 Common contact of pallet and nut

2.3.1 托盘与螺母平面接触型

螺母对托盘压力大小等于托锚力,则螺母与托盘之间的摩擦力为

$$F_A = \mu T = \mu ij \lambda \varphi \quad (15)$$

式中,μ 为螺母与托盘间的摩擦因数。

如图 5 所示,设螺母与托盘间压力为均布载荷,则摩擦力面密度 f_a 为

$$f_a = \frac{F_A}{A} = \frac{8\mu ij \lambda \varphi}{3\sqrt{3} D_1^2 - 2\pi D_2^2} \quad (16)$$

式中,A 为螺母端面面积;D₁ 为螺母外接圆直径。

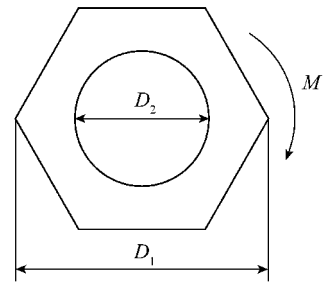


图 5 托盘与螺母平面接触型

Fig. 5 Pallet and nut under plane contact

$$E(f_i) = \iiint f_a \rho^2 d\theta d\rho d\varphi =$$

$$\frac{[3\sqrt{3}(31\ln 3 + 4)D_1^3 - 16\pi D_2^3] \mu ij \lambda \varphi^2}{48(3\sqrt{3} D_1^2 - 2\pi D_2^2)} \quad (17)$$

2.3.2 托盘与螺母环线接触型

环线摩擦做功,其表达式为

$$E(f_i) = \frac{1}{2} \int_0^\varphi \mu ij \lambda d\varphi d\varphi = \frac{1}{4} \mu ij \lambda d\varphi^2 \quad (18)$$

2.4 E(M)关系表达式

如图 3, 安装锚杆拧紧螺母扭矩 $M(\varphi)$ 做功 $E(M)$ 为

$$E(M) = \int_0^\varphi M(\varphi) d\varphi \quad (19)$$

2.5 初始支护阻力 p 的理论解

(1) 托盘与螺母平面接触型。将式 (13), (14), (17), (19) 带入式 (11) 中, 等式两边同时对 φ 求导, 并结合式 (10) 得

$$p = 24(3\sqrt{3}D_1^2 - 2\pi D_2^2)M(\varphi) / ij \{ 12(\tan \alpha + k) (3\sqrt{3}D_1^2 - 2\pi D_2^2)d + [3\sqrt{3}(3\ln 3 + 4)D_1^3 - 16\pi D_2^3] \mu \} \quad (20)$$

(2) 托盘与螺母环线接触型。将式 (13), (14),

(18), (19) 带入式 (11) 中, 等式两边同时对 φ 求导, 并结合式 (13) 得

$$p = \frac{2}{ijd(\mu + k + \tan \alpha)} M(\varphi) \quad (21)$$

3 物理实验验证

为了验证理论推导的是否合理, 采用自制的“锚杆锚固传递及衰减规律”模拟试验台开展研究。它由卡盘、台桌底座、规格为 $\phi 20 \sim 2\ 400\ \text{mm}$ 和 $\phi 22 \sim 2\ 600\ \text{mm}$ 的测力锚杆、扭矩扳手、带中心孔的特制托盘压力盒、数据采集仪等组成。根据式 (20), (21) 推导和通过该实验平台得出的初期支护阻力 p 与预紧力矩 $M(\varphi)$ 的对应关系比较, 如图 6 所示, 其中 ψ, k, μ 依次为 $12^\circ, 0.1, 0.14$; $\phi 20$ 和 $\phi 22$ 锚杆的 D_1, D_2, d 分别为 $39.3, 20, 19.5$ 和 $41, 22, 21.5\ \text{mm}$; 锚杆间排距 $800\ \text{mm} \times 800\ \text{mm}$ 。

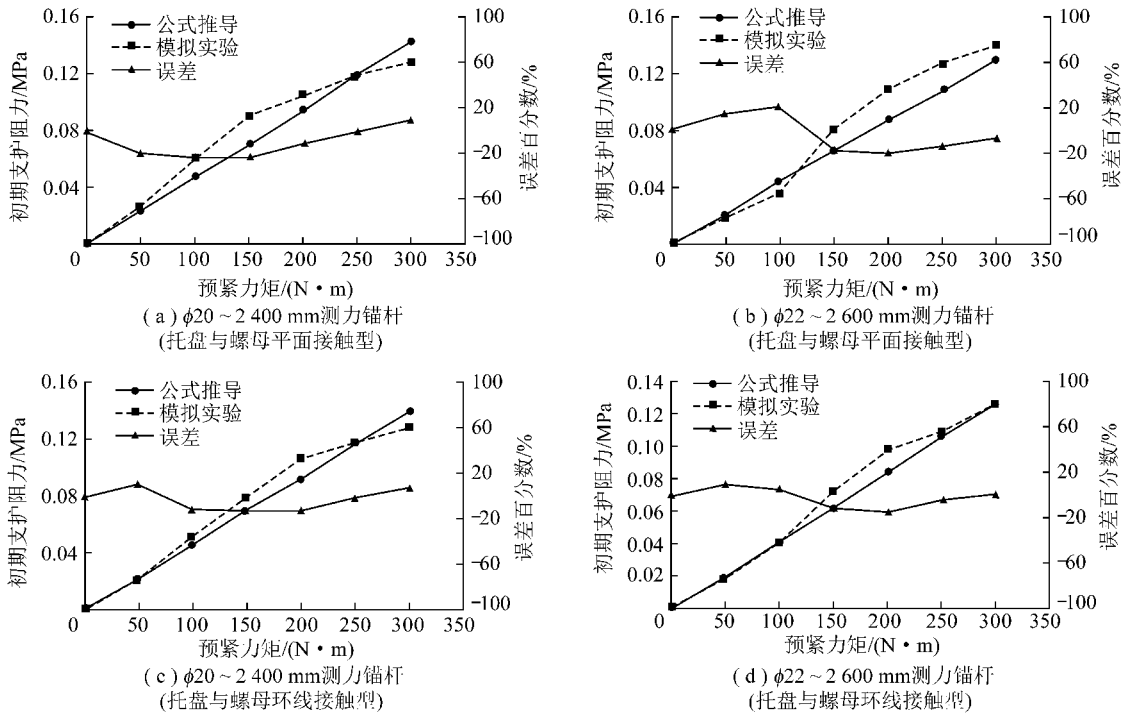


图 6 初期支护阻力与预紧力矩的对应关系

Fig. 6 Relationship between initial support pressure and tightening torque

由图 6 可知: ① 在锚杆支护材质规格及支护间排距相同时, 初始支护阻力与预紧力矩呈线性关系; ② 预紧力矩在 $0 \sim 300\ \text{N} \cdot \text{m}$ 时, 施加相同的预紧力矩, 理论计算结果和物理实验分别得出的初期支护阻力值相近, 相差在一个较小且可以接受的范围内; ③ 理论推导得出的支护阻力随预紧力矩的变化趋势与实验结果类似, 因此, 可以通过预紧力矩预测锚杆支护初期支护阻力。

4 结 论

(1) 基于锚杆及时支护时锚固围岩仍处于弹塑性变形阶段, 推导出锚杆支护螺母、托盘 2 种接触类型的初始支护阻力的理论解, 在锚杆支护材质规格及支护间排距相同时, 初始支护阻力与预紧力矩呈线性关系。

(2) “锚杆锚固传递及衰减规律”模拟结果表

明,预紧力矩在 $0 \sim 300 \text{ N} \cdot \text{m}$,理论推导得出的支护阻力理论解合理,通过预紧力矩能够准确量化和预测锚杆初始支护阻力。

(3) 文中的结果基于锚固围岩处于弹塑性状态的假设,是理想化的状态,未考虑应变软化对锚杆支护阻力的影响,该模型有待进一步完善。

参考文献:

- [1] 何满潮. 深部的概念体系及工程评价指标[J]. 岩土力学与工程学报, 2005, 24(16): 2854-2858.
He Manchao. Conception system and evaluation indexes for deep engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2854-2858.
- [2] 谢和平, 彭苏萍, 何满潮. 深部开采基础理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 3-8.
Xie Heping, Peng Suping, He Manchao. Basic theory and engineering practice for deep mining[M]. Beijing: Science Press, 2006: 3-8.
- [3] 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 Liang. Control principle of separating and broken roof rock strata in roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 34-38.
- [4] 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 Hongpu, Jiang Tieming, Gao Fuqiang. Effect of pretensioned stress to rock bolting[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 680-685.
- [5] Zhang Nong, Wang Cheng, Zhao Yiming. Rapid development of coalmine bolting in China[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, 1(1): 41-46.
- [6] 侯朝炯, 郭励生, 勾攀峰, 等. 煤巷锚杆支护[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999: 17-31.
Hou Chaojiong, Guo Lisheng, Gou Panfeng, et al. Bolt support of coal roadway[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1999: 17-31.
- [7] 柏建彪. 沿空掘巷围岩控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006: 68-69.
Bai Jianbiao. Surrounding rock control of gateway driven along goaf[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2006: 68-69.
- [8] 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.
Kang Hongpu, Wang Jinhua. Roadway bolting theory and complete technology for coal roadways[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2007.
- [9] 李 晓. 岩石峰后力学特性及其损伤软化模型的研究与应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1995.
Li Xiao. Research and application of rock mechanical properties and damage softening mode in post-peak[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 1995.
- [10] 张广云. 锚杆预紧扭矩与预紧力关系研究[J]. 科技情报开发与经济, 2011, 21(1): 195-198.
Zhang Guangyun. Study on the relationship between bolt's pre-tightening torque and pre-tightening force[J]. Sci-tech Information Development & Economy, 2011, 21(1): 195-198.
- [11] 王晓鸣. 锚杆支护预紧力的初步研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(12): 26-27.
Wang Xiaoming. Principium reseach and application on rockbolt supporting pretightening force[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(12): 26-27.
- [12] 王金华. 我国煤巷锚杆支护技术的新发展[J]. 煤炭学报, 2007, 32(2): 113-118.
Wang Jinhua. New development of rock bolting technology for coal roadway in China[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(2): 113-118.
- [13] 张国华, 张雪峰, 蒲文龙, 等. 回采巷道顶板锚杆组合作用下锚杆预紧力理论确定[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2009, 24(3): 6-10.
Zhang Guohua, Zhang Xuefeng, Pu Wenlong, et al. Theoretical determination of bolt pre-tightening force on the bolt combined effect in the roof of mining roadway[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2009, 24(3): 6-10.
- [14] 陆士良, 汤 雷, 杨新安. 锚杆锚固力与锚固技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998: 25-26.
Lu Shiliang, Tang Lei, Yang Xin'an. Bolt anchoring force and anchoring technique[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1998: 25-26.
- [15] 张 农, 王 成, 高明仕, 等. 淮南矿区深部煤巷支护难度分级及控制对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2421-2428.
Zhang Nong, Wang Cheng, Gao Mingshi, et al. Roadway support difficulty classification and controlling techniques for Huainan deep coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2421-2428.
- [16] 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): 1153-1159.
Kang Hongpu, Lin Jian, Wu Yongzheng. High pretensioned stress and in tensive cable bolting technology set in full section and application in entry affected by dynamic pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1153-1159.
- [17] 刘鸿文. 材料力学 I [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 37-40.
Liu Hongwen. Mechanics of materials (I) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 37-40.
- [18] 刘鸿文. 材料力学 II [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 28-60.
Liu Hongwen. Mechanics of materials (II) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 28-60.