

激励法超前探测技术电场约束效率研究

张伟杰¹ 张玉洁¹ 张有东¹ 吴 淼²

(1. 华北科技学院 机电工程学院 北京 101601; 2. 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院 北京 100083)

摘 要: 为了研究激励法超前探测仪器工作效率最佳时约束电极的位置参数 b 和电流强度参数 k 的取值范围, 分析了激励法超前探测技术的基本原理, 将掘进工作面前方煤(岩)看作线性时不变系统, 建立了掘进工作面电场的数学模型, 得出了掘进前方某位置的标量电位函数, 提出了电场约束效率 η_{ei} 的概念。借助 Matlab 软件, 通过对比参数 b 和 k 分别取不同值时, 约束效率 η_{ei} 及其增量 $\Delta\eta_e$ 的变化规律, 分析电极位置参数 b 和电流强度参数 k 对探测范围的影响, 得出 b 和 k 的最佳取值是 $b = 3 \text{ m}$, $k = 2.0 \sim 2.5$, 此时超前探测仪器的工作效率最高。

关键词: 超前探测; 激励法; 标量电位函数; 约束效率

中图分类号: TD15 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2015)06-0102-05

Study on electrical field restriction efficiency of excitation method advance detection technology

Zhang Weijie¹ Zhang Yujie¹ Zhang Youdong¹ Wu Miao²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China;

2. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the parameter of the restriction electrode location when the working efficiency of the advance detection instrument applied in the excitation method was in the best time and the value selection ranging of the current strength parameter, the paper analyzed the basic principle of the excitation method advance detection technology. The coal (rock) in the front of the mine gateway driving face as an unchanged system in linear was applied to establish a mathematic model of the driving face electric field. The scalar electric potential functions of a location in the front of the driving face were listed and the conception on the restriction efficiency of the electric filed. Due to the Matlab Software application with the comparison and individual collection of the different value as well as the restriction efficiency η_{ei} and increased variation law $\Delta\eta_e$, the paper analyzed the electrode location parameters and the current strength parameters and the influences to the detection scope. The obtained value b and the optimized value k would be 3 m and 2.0 ~ 2.5 respectively. At this moment, the working efficiency of the advance detector would be the highest.

Key words: advance detection; excitation method; scalar electric potential function; restriction efficiency

0 引 言

煤矿井下巷道掘进工作面前方隐伏的地质构造,如地下水、断层、陷落柱等,给安全生产带来很大威胁^[1-3]。因此,《煤矿安全规程》规定“矿井必须做好水害分析预报和充水条件分析,坚持预测预报、有掘必探、先探后掘、先治后采的防治水原则”^[4]。

现有的超前探测方法除钻探法外,大都是基于电法原理或波反射原理的物探方法,其因方向性差、效率和准确率低,或因探测距离太短,或因仪器操作复杂、探测代价高等因素和不足,造成在实际的掘进过程中常达不到《煤矿安全规程》的要求,为掘进工作留下了很大的安全隐患,进而加剧了探测、掘进矛盾,致使掘进区成为煤矿重大事故(特别是突水事

收稿日期: 2015-01-08; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2015.06.019

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)重大基金资助项目(2012AA06A405); 中央高校基本科研业务费资金资助项目(3142013063); 华北科技学院教研基金资助项目(HKJY201409)

作者简介: 张伟杰(1972—),女,河北邯郸人,副教授,博士。Tel: 15201690045, E-mail: wzhangweijie@163.com

引用格式: 张伟杰, 张玉洁, 张有东, 等. 激励法超前探测技术电场约束效率研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(6): 102-106.

Zhang Weijie, Zhang Yujie, Zhang Youdong et al. Study on electrical field restriction efficiency of excitation method advance detection technology [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(6): 102-106.

故) 的高发地, 严重威胁人员和设备的安全。因此, 研究一种能与掘进设备协同作业, 并实现全方位扫描和地质异常体准确定位的超前探测技术已成为当前煤矿掘进与安全生产领域的热点研究方向。

激励法超前探测技术是利用围岩中地质异常体激电效应比较明显的特征, 采用双频调制波电流作为激励电流, 测量掘进前方围岩发生激发极化后的激电参数, 同时根据同性电场相斥的性质, 利用约束电极发射电流形成的约束电场与主电极发射电流形成的探测电场相互作用, 使探测电场的传播方向与传播范围控制一定区域内, 实现角度扫描和深度扫描探测, 达到定方向、定距离探测的目的^[5]。电场的约束效率则是研究约束电极和主电极的位置参数及电流取值对探测范围的影响, 是激励法超前探测技术研究的最重要内容之一。

1 激励法超前探测技术原理

如图 1a 所示, 主电极 A 位于巷道断面中央, 约束电极(B1—B8) 布置在四周, 主电极和约束电极同时向掘进前方发射同频率、同极性的双频(高频和低频) 交流电流, 根据电荷同性相排斥原理, 2 种电极产生的电场相互排斥, 使探测电场的传播方向与传播范围得以约束, 即在前方探测距离内呈喇叭口状, 从而很好地控制了电场在介质中传播的方向性问题, 减弱了电场的全空间效应。如图 1b 中 C 为接地电极, 在 A—C 及 B—C 间经围岩体内形成探测电场, 当探测电场穿过地质异常体时, 产生激发极化效应, 测量 A—C 间的电位差, 可获得围岩激发极化信息, 从而判定前方围岩地质状况^[6-7]。

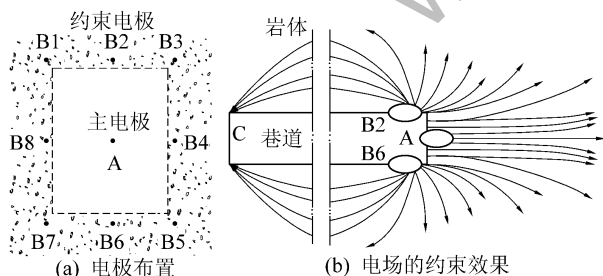


图 1 电极布置与电场效果约束

Fig. 1 Configuration of electrodes and electric field restriction

设 ΔV_H 、 I_H 分别为系统以高频 f_H 供电时测得的电极 A 与 C 之间的电位差、电流; ΔV_L 、 I_L 分别为系统以低频 f_L 供电时测得的电极 A—C 间的电位差、电流。根据式(1)、式(2) 可求得高频视电阻率 ρ_{sH} 和低频视电阻率 ρ_{sL} 。

$$\rho_{sH} = \Delta V_H / I_H \quad (1)$$

$$\rho_{sL} = \Delta V_L / I_L \quad (2)$$

取 $I_H = I_L$ 时, 得出百分频率效应值 PFE (Percent Frequency Effect) 为

$$PFE = (\rho_{sL} - \rho_{sH}) / \rho_{sL} \times 100\% = (\Delta V_L - \Delta V_H) / \Delta V_L \times 100\% \quad (3)$$

将由式(1) — 式(3) 获得的反映围岩激发极化信息的视电阻率 ρ_s 及百分频率效应 PFE 值等参数与无地质异常时的值对比, 即可对前方是否存在地质构造进行判断。

2 掘进工作面电场数学模型的建立

由于掘进巷道内介质条件非常复杂, 有多种机械、电气设备和金属导体等, 影响电场的因素繁多。为研究方便, 假设如下: ①在常用的供电频率范围内, 掘进面前方煤(岩) 为线性时不变系统, 具有各向同性、线性均匀的性质; ②掘进面前方没有异常地质构造时, 煤系地层介质电阻率均匀, 且大小为 ρ ; ③忽略工作面内的设备、湿度、温度等影响^[8]。

电极插入掘进工作面煤(岩) 壁, 如果不考虑电场间的相互影响, 则在煤(岩) 内形成的电场是以各个电极为中心的发散电场, 电场中的等位面是以相应电极为圆心的同心圆^[9], 如图 2 所示(仅为主电极产生的电场)。为研究掘进方向煤(岩) 内某点 M 处电场性质, 取主电极位置为空间坐标系的原点 O, 掘进方向为横坐标正方向, 掘进铅垂面为纵坐标, 建立平面坐标系 XOY。

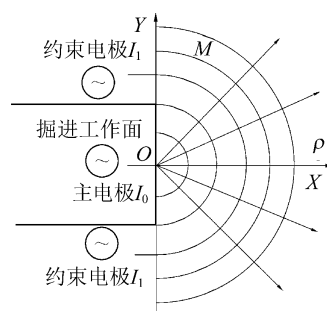


图 2 掘进工作面空间电场

Fig. 2 Space electric field of driving face

通过已完成的沙槽和水槽试验可知, 主电极形成的探测电场是半空间电场, 而各个约束电极形成的约束电场近似为全空间电场。总电场的特性是各个电极形成电场矢量叠加后的结果。

设掘进前方介质的电阻率为 ρ , 主电极电流强度为 I_0 , 在仅考虑主电极发射电场时, 距 O 点为 x 半

径的 M 点的电位函数 $\varphi_0(x)$ 为

$$\varphi_0(x) = \rho I_0 / (2\pi x) \quad (4)$$

因位场是标量场,根据电位的叠加原理,距 O 点半径为 x 的 M 点因各约束电极形成的电位近似为各约束电极电场电位之和 $\varphi_p(x)$,即:

$$\varphi_p(x) = \frac{\rho}{4\pi} \sum_{i=1}^8 I_i / x_i \quad (5)$$

式中: I_i 为第 i 个电极的电流强度; x_i 为 M 点到第 i 个约束电极的距离。

综合式(4)、式(5)得到在主电极和8个约束电极的共同作用下 M 点的标量电位函数 $\varphi(x)$ 为

$$\varphi(x) = \varphi_0(x) + \varphi_p(x) = \frac{\rho I_0}{2\pi x} + \frac{\rho}{4\pi} \sum_{i=1}^8 I_i / x_i \quad (6)$$

电场强度是一个随着空间点位置不同而变化的矢量函数。在电场中的任何一个指定点,电场强度与产生电场的源量大小成正比。正是由于场与源之间的线性关系,可以利用叠加原理来计算多个场源所形成场的电场强度,即电场中某一点的电场强度等于各个点电荷单独在该点产生的电场强度的矢量之和。又因静电场是一个无旋场,任何一个标量函数的梯度的旋度恒等于零。

故静电场的电场强度 $E(x)$ 可以由标量函数 $\varphi(x)$ 的梯度来表示,即:

$$E(x) = -\nabla\varphi(x) \quad (7)$$

3 电场约束规律的分析

约束电极的位置和电流强度均会影响探测电场的约束效果,因此在掘进工作面数学模型的基础上,利用 Matlab 软件对电场的约束效果进行仿真,通过分析电场约束效率的相对大小,确定约束电极参数的最佳取值,对于探测仪器硬件开发具有重要的指导意义。

3.1 电场约束效率的概念

各约束电极电流强度取相同值时,探测电场传播方向为掘进正前方的喇叭口范围。为研究当约束电极电流强度 I_i 与主电极电流强度 I_0 以及约束电极位置变化时,约束电场对主电场约束效果的影响,特提出电场约束效率 η 的概念^[11-13]。并称 $k = I_i / I_0$ 为电流参数,称约束电极到坐标 O 点的距离 b 为位置参数。

如图3所示,选取 $k=0$ 时(不加约束电场)的1条参考电力线 L ,点 $A(m, r_0)$ 为 L 上一点。 A 点处的

电位 φ_A 和电场强度 E_A 分别为

$$\varphi_A = \frac{I_0 \rho}{2\pi\sqrt{m^2 + r_0^2}} \quad (8)$$

$$E_A = -\nabla\varphi_A \quad (9)$$

当 $k \neq 0$ 时(即 I_2 和 I_6 均不为零),约束电场对主电场产生约束作用,则存在任一点 $B(m, r_i)$,有:

$$\varphi_B = \frac{I_0 \rho}{2\pi\sqrt{m^2 + r_i^2}} + \frac{I_2 \rho}{4\pi\sqrt{m^2 + (r_i - b)^2}} + \frac{I_6 \rho}{4\pi\sqrt{m^2 + (r_i + b)^2}} \quad (10)$$

$$E_B = -\nabla\varphi_B \quad (11)$$

$$\text{令 } E_B = E_A, \text{ 即 } -\nabla\varphi_A = -\nabla\varphi_B \quad (12)$$

根据探测实际需要和简化计算,取 $m=50$ m,解式(12)可得到 r_i 的值(计算过程略)。可通过比较 r_0 和 r_i 的大小来分析约束电场对探测电场的约束作用,故电场约束效率 η_{ei} 定义为:

$$\eta_{ei} = \frac{r_0 - r_i}{r_0} \times 100\% \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (13)$$

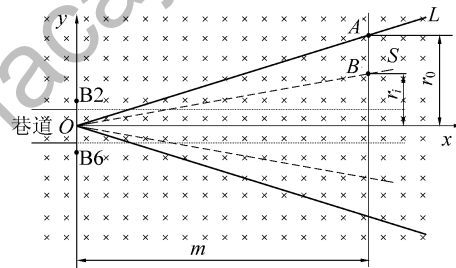


图3 电场约束效率的定义

Fig. 3 Definition of electric field restriction efficiency

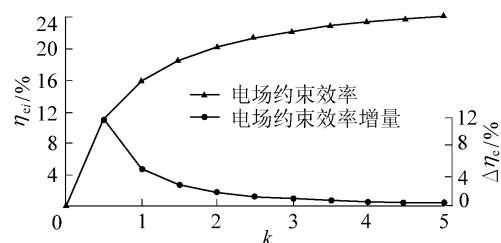
3.2 改变电流参数 k 时电场约束效率分析

取 $b=2.0$ m,表1列出了 k 分别取0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0时,同一条参考电力线在 y 轴上的坐标值 r_i 和对应的电场约束效率 η_{ei} 以及相应的增量值 $\Delta\eta_e$ 。其计算方法为^[14]: $\Delta\eta_e = \eta_{e(i+1)} - \eta_{ei}$ 。图4是表1中数据的曲线表示,分析表1和图4可以得出,在约束电极纵坐标保持不变($b=2$ m)时:① k 值增大时,电场约束效率随之增大;② k 值增大时,电场约束效率增量呈下降趋势;③ k 值大于3.5后,电场约束效率曲线和电场约束效率增量曲线趋于缓平。

因此,单纯通过增大约束电极电流强度来增大电场约束效率的办法不可取; k 值越大,需要的发射装置功率越大,所以,从节能的角度考虑, k 取值不宜大于3.5。

表 1 k 值不同时的电场约束效率及其增量值
Table 1 Electric field restriction efficiency and its increment with different k

k_i	r_i / m	$\eta_{ei} / \%$	$\Delta\eta_e / \%$
0	41.52	0	—
0.5	36.87	11.20	11.20
1.0	34.90	15.94	4.74
1.5	33.81	18.57	2.63
2.0	33.11	20.26	1.69
2.5	32.64	21.39	1.13
3.0	32.28	22.25	0.86
3.5	32.02	22.88	0.63
4.0	31.81	23.39	0.51
4.5	31.63	23.82	0.43
5.0	31.49	24.16	0.34

图 4 k 不同时的电场约束效率及其增量曲线Fig. 4 Curves of electric field restriction efficiency and its increment with different k

3.3 改变位置参数 b 时电场约束效率分析

令 b 分别取 2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 m, 电场约束效率数值列于表 2 中。图 5 是表 2 中数据的曲线表达形式。由表 2 和图 5 可得:

1) 电场约束效率随 b 和 k 的增大而增大, 电场约束效率曲线呈单调上升趋势。

表 2 电场约束效率随 k 和 b 变化的数据Table 2 Electric field restriction efficiency data with k and b

k	不同 b 值下电场约束效率 / %				
	2.0 m	2.5 m	3.0 m	3.5 m	4.0 m
0	0	0	0	0	0
0.5	11.20	16.57	24.33	24.78	24.81
1.0	15.94	22.86	31.67	33.19	36.63
1.5	18.57	26.18	35.04	37.52	41.47
2.0	20.26	28.25	37.14	40.17	44.46
2.5	21.39	29.67	38.56	41.96	46.48
3.0	22.25	30.71	39.57	43.26	47.95
3.5	22.88	31.48	40.37	44.22	49.06
4.0	23.39	32.08	40.97	44.99	49.93
4.5	23.82	32.59	41.47	45.62	50.63
5.0	24.16	33.00	41.88	46.12	51.20

2) 电场约束效率曲线互不相交, 但随着 k 值的增加, 各条曲线之间的距离变小, 体现出增量的减少

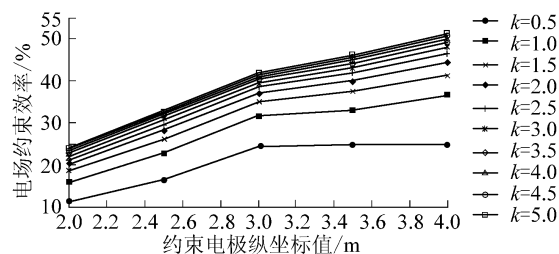


图 5 电场约束效率随约束电极纵坐标值变化曲线

Fig. 5 Curves of electric field restriction efficiency with the ordinate value of constraint electrode

趋势。

3) k 值恒定时, 约束电极的位置距主电极越远, 电场约束效率越高。

4) b 值恒定时, 约束电极与主电极电流强度比值越大, 电场约束效率越高。

4 最佳电极参数确定

为了找出电极参数的最佳值, 需分析电场约束效率增量较大时的约束电极纵坐标位置区间, 故将表 2 中约束效率的增量列于表 3 中。图 6 是表 3 中数据的曲线表达形式。

表 3 电场约束效率增量

Table 3 Electric field restriction efficiency increment

k	不同 b 值下电场约束效率增量 / %			
	2.0 ~ 2.5 m	2.5 ~ 3.0 m	3.0 ~ 3.5 m	3.5 ~ 4.0 m
0.5	5.37	7.76	0.45	0.03
1.0	6.91	8.82	1.52	3.44
1.5	7.61	8.86	2.48	3.95
2.0	7.99	8.89	3.03	4.29
2.5	8.28	8.89	3.4	4.52
3.0	8.46	8.86	3.69	4.69
3.5	8.60	8.89	3.85	4.84
4.0	8.69	8.89	4.02	4.94
4.5	8.77	8.88	4.15	5.01
5.0	8.84	8.88	4.24	5.08

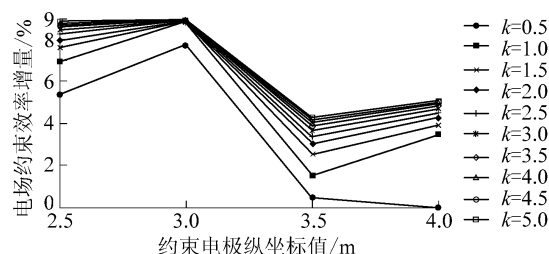


图 6 电场约束效率增量随约束电极纵坐标变化曲线

Fig. 6 Curves of electric field restriction efficiency increment with the ordinate value of constraint electrode

1) 当 k 值大于 2.5 时, 电场约束效率的增加量不太明显。

2) 激励法电法超前探测电场约束效率的增量值在 b 取 3 m 时达到最大。

故可得出最佳电极参数值为: 电流参数 $k=2.0 \sim 2.5$, 电极位置参数 $b=3$ m。

5 结 语

激励法电法超前探测技术是利用介质激发极化特性, 间接判定巷道前方是否存在异常地质体的一种方法。笔者建立了半空间+全空间的电场数学模型, 提出了电场约束效率概念, 研究了电极参数与电场约束效率之间的规律, 找出了电极参数的最佳范围, 经过试验证明了在此取值下, 仪器的工作效率最高, 为仪器的研制与优化奠定了基础。

参考文献:

- [1] 韩进. 矿井水害监控及决策支持技术研究[D]. 上海: 上海大学, 2007.
- [2] 李新凤, 魏久传, 尹会永, 等. 肥城矿区矿井水害类型及特征研究[J]. 煤矿开采, 2008, 13(2): 13-15.
Li Xinfeng, Wei Jiuchuan, Yin Huiyong, et al. Mine flood type and characteristics of Feicheng Mining Area[J]. Coal mining Technology, 2008, 13(2): 13-15.
- [3] 李佩全, 刘登宪, 李永. 淮南矿区矿井水害调研分析[J]. 华北科技学院学报, 2008, 5(1): 5-8.
Li Peiquan, Liu Dengxian, Li Yong. Analysis of Huainan mine water disaster investigation[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2008, 5(1): 5-8.
- [4] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2010.
- [5] 张伟杰, 郝明锐, 杜毅博, 等. 基于双频激电法的煤矿巷道超前探测新技术初探[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(3): 73-75.
Zhang Weijie, Hao Mingrui, Du Yibo, et al. New technology of mine-tunnel ahead detection[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(3): 73-75.
- [6] Zhang Weijie, Hao Mingrui, Zhang Weizhen, et al. Study on realtime ahead detection technology for mining roadway based on double frequency induced method[C]// The 2nd International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, July 20-22, 2011: 722-725.
- [7] 中国矿业大学(北京). 电场约束法煤安型综掘机载地质构造探测系统[P]. 中国, ZL201110430066.0, 2013.
- [8] 何继善. 双频激电法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [9] 何继善, 柳建新. 隧道超前探测方法技术与应用研究[J]. 工程物理地球学报, 2004(8): 294.
He Jishan, Liu Jianxin. A study of the tunnel advanced detection technology and its application[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004(8): 294.
- [10] Zhang Weijie, Zhang Weizhen, Wu Miao. Modeling and Simulation of Ahead Detection Technology for Mining Roadway Based on IP Method[C]// 2011 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, December 18-20, 2011: 28-32.
- [11] 张伟杰, 郝明锐, 吴森. 煤巷掘进含水地质构造探测仿真及参数分析[J]. 煤炭工程, 2012(7): 74-77.
Zhang Weijie, Hao Mingrui, Wu Miao. Simulation on water bearing geological structure detection of mine seam gateway driving and analysis on parameters[J]. Coal Engineering, 2012(7): 74-77.
- [12] Zhang Weijie, Zhao Qifeng. Simulation of fallen-column geological structure detection of tunnel face and parameters analysis[C]// 2013 International Conference on Mechatronics, Applied Mechanics and Energy Engineering, July 27-29, 2013: 357-363.
- [13] Zhang Weijie, Hao Mingrui, Liu Zhimin. Simulation and parameters analysis of fault geological structure for detection in the excavation face[C]// 2013 International Conference on Renewable Energy and Environmental Technology, 2013: 3742-3746.
- [14] 林飞, 杜欣. 电力电子应用技术的 MATLAB 仿真[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [15] China Coal Society, 2009, 34(9): 1153-1159.
- [13] 王金华. 全煤巷道锚杆锚索联合支护机理与效果分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 1-7.
Wang Jinhua. Analysis on mechanism and effect of rock bolts and cables in gate road with coal seam as roof[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 1-7.
- [14] 冯京波. 松散厚煤层全煤巷沿空掘巷锚索支护技术[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(2): 23-26.
Feng Jingbo. Bolt and anchor combined support technology for full seam gateway driving along next goaf in soft thick seam[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(2): 23-26.
- [15] 褚晓威, 鞠文君, 吴拥政. 矿用小孔径预应力锚索单孔锚具滑脱机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(12): 16-23.
Chu Xiaowei, Ju Wenjun, Wu Yongzheng. Research on slip-page mechanism of single anchoring device in mine small diameter pre-stress anchor[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(12): 16-23.
- [10] 孙玉福. 高强度锚索支护技术及在潞安矿区的应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 595-599.
Sun Yufu. Application of high strength cable bolting technology in Lu'an Coal Mining Area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 595-599.
- [11] 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(12): 1233-1238.
Kang Hongpu, Wang Jinhua, Lin Jian. High pre-tensioned stress and intensive bolting system and its application in deep roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(12): 1233-1238.
- [12] 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 intensive cable bolting technology set in full section and application in entry affected by dynamic pressure[J]. Journal of

(上接第33页)