

文章编号: 0253-9993(2012)07-1184-06

非间隔式注氮防灭火装置动力参数

朱红青, 李峰, 张振羽, 左东方, 李丹

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对传统埋管注氮防灭火工艺中存在的重大缺陷: 注氮点在采空区空间上存有间隔, 氮气未能形成连续性分布, 惰化效果差, 氮气消耗量大, 注氮管不能回收, 造成极大的资源浪费, 基于采空区注氮管的抗剪切能力优于抗拉能力的原理, 设计了旋转牵引方式的非间隔式注氮防灭火工艺, 可使注氮点与工作面保持同步位移, 发挥最佳注氮效应。根据弹性力学中分析平面问题的相关原理, 提出了非间隔式注氮防灭火工艺的动力参数计算方法。利用岩土工程数值模拟软件模拟了燕子山矿采空区注氮管的应力分布状况, 并以此为依据计算了动力值。

关键词: 非间隔式; 注氮防灭火; 动力参数; 旋转牵引

中图分类号: TD753.3

文献标志码: A

Traction power parameter of non-interval drag pipe nitrogen injection for fire control

ZHU Hong-qing, LI Feng, ZHANG Zhen-yu, ZUO Dong-fang, LI Dan

(Faculty of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problems of buried tube nitrogen injection that the nitrogen injection spot with intervals in the space causes the failure of continuous nitrogen distribution in goaf, leading to poor inert effect. In addition, the unreclaiming of the nitrogen injection pipe causes great resources waste. Based on the principle that the shear capacity of the mining nitrogen injection pipe is superior to its tensile strength, new fire nitrogen injection process (rotating traction and non-interval) was designed, fundamentally solving major defects of buried pipe nitrogen injection, which can realize the synchronous movement between nitrogen injection point and the workplace. According to the relevant principles of planar problems in elastic mechanics, the calculation method about dynamic parameter of non-interval nitrogen injection process for fire control was put forward. By using a geotechnical engineering numerical simulation software, the stress distribution of the nitrogen injection pipe in the goaf of Yanzishan Mine was simulated, and the traction power was computed based on it.

Key words: non-interval; nitrogen injection for fire control; traction power parameter; rotating traction

注氮防灭火是预防采空区煤自燃, 惰化火区的主要方法之一, 现今常用的注氮方式是埋管注氮。埋管注氮管路的布置通常采用的方法是: 在工作面的进风侧采空区埋设1条注氮管路, 当注氮管埋入采空区一定长度后开始注氮, 同时埋入第2条注氮管路, 当第2条注氮管口埋入采空区氧化带与冷却带的交界部位时向采空区注氮, 停止第1条管路的注氮, 同时重

新埋设新的注氮管路, 如此循环交替, 直至工作面回采完毕^[1]。这种注氮方法需要每隔一定的步距(即: 氧化带宽度)就重新铺设一趟注氮管路, 需要大量的人力、物力进行注氮管道的加工、装车、调运、安装, 同时注氮管路不能回收, 造成极大的经济损失。从中可知, 埋管注氮方式存在重大缺陷: ①注氮点在空间上存在间隔, 致使氮气在采空区未形成连续性分布, 注

收稿日期: 2011-07-04 责任编辑: 毕永华

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51074168)

作者简介: 朱红青(1969—), 男, 湖南双峰人, 教授, 博士生导师。E-mail: zhq@cumt.edu.cn

氮惰化效果差,所需注氮量大;②注氮埋管交替丢弃在采空区内,材料不能回收,造成极大的资源浪费,投入成本大。非间隔式注氮防火工艺能从根本上解决传统埋管注氮方式中的两大缺陷,保持注氮点在空间上的连续,实现氮气在采空区的连续性分布,发挥最佳注氮惰化效果,同时回收注氮管材,有着极大的经济和社会效益^[2-4]。同时,根据弹性力学中解平面问题的相关原理,研究相关动力参数为实现非间隔式注氮防火工艺提供了参考。

1 非间隔式注氮防火装置的设计

1.1 基本原理

为克服传统埋管注氮存在的严重缺陷,非间隔式注氮防火工艺需具备以下两个特点:

(1) 保持注氮点在采空区空间上的连续,发挥最佳注氮惰化效果;

(2) 实现注氮管路的回收,节约资源。

由于注氮管的材质选用高强度、高硬度而且耐摩擦性能好的脆性材料(一般选用铸铁或高碳钢),根据拉伸和扭转断裂试验结果可知:

(1) 拉伸断裂过程中,管路沿中点附近位置的某一横截面破坏;

(2) 扭转断裂过程中,管路沿中点附近位置与轴线成 45° 角的螺旋面破坏。

根据材料力学相关原理可知:应力状态与试件的材料无关,拉伸断裂过程中破坏的横截面与扭转断裂的螺旋面均是最大拉应力所在的平面,可知注氮管的破坏均由拉伸导致,说明注氮管的抗剪切能力优于抗拉能力^[5-7]。

采空区注氮管表面所受压力来源于上覆岩层对其的铅直载荷与水平载荷,注氮管在旋转过程所受阻力主要是表面的摩擦力,而且受到的最大阻力是注氮管由静止转变成运动过程中所产生的最大静摩擦力。

基于以上叙述,将非间隔式注氮防火工艺设计成边旋转边牵引的方式,可以利用注氮管的抗剪切能力克服牵引过程中的最大阻力,同时具有松动注氮管周围岩层,降低阻力的作用;而且能保持注氮点与工作面的同步移动,使注氮点在采空区保持空间上的连续,实现对采空区特定区域的注氮惰化。

1.2 装置详细设计

旋转牵引式非间隔注氮防火工艺需要同时给注氮管施加旋转扭矩轴向拉力,达到旋转注氮管的同时牵引注氮管向采空区外运动的目的。其主要由注氮管、端头螺纹、钢丝绳、减速机、套筒、牵引螺纹、钢丝绳缠绕管与固定支座组成,具体安装过程如下:

- (1) 氮气从氮气出口流出;
- (2) 注氮管始端用螺纹与减速机机轴连接;
- (3) 利用固定装置来固定减速机机轴;
- (4) 机轴表面约3 m长加工牵引螺纹,套筒加工内螺纹与牵引螺纹连接,调整套筒固定装置的角度,固定套筒;
- (5) 注氮管末端上加工注氮小孔;
- (6) 注氮管内沿轴向方向上安装有钢丝绳;
- (7) 减速机底座安装有固定支座;
- (8) 减速机机轴另一端连接旋转接头;
- (9) 旋转接头通过法兰连接钢丝缠绕管;
- (10) 利用固定装置,打顶柱固定套筒。

具体工艺过程:

- (1) 各段注氮管用螺纹连接后,每隔2 m用木块垫底,使注氮管的中心距与减速机机轴的中心距一致;
- (2) 启动减速电机,牵引注氮管路缓慢旋转,利用套筒与减速机机轴内外咬合的螺纹的相对旋转运动,牵引注氮管路向采空区外移动;
- (3) 当注氮管路移动距离达到移动步距(3 m)时,关闭减速电机,停止牵引注氮管路;
- (4) 拆除套筒固定装置,旋转固定套筒至开始端;
- (5) 释放钢丝缠绕管,恢复装置的原始状态,重复下一循环。

2 动力参数研究

采空区注氮管表面受力状况为二向应力,类似于圆筒的受力状态,可以归结为平面问题来分析。

根据弹性力学中的拉梅公式,其原理如图1所示,可知:

$$\sigma_r = \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) p_i - \frac{b^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) p_0 \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) p_i - \frac{b^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) p_0 \quad (2)$$

式中, σ_r , σ_θ , a , b , r , p_0 , p_i 分别为径向应力、切向应力、圆管内半径、圆管外半径、管上一点到圆心的距离、圆管所受外部压应力、圆管所受内部压应力^[8-9]。

式(1),(2)与弹性常数无关,适用于平面问题与任意壁厚情况,采空区注氮管表面所受压力来源于上覆岩层对其的铅直载荷与水平载荷,假定圆管所受内部压应力为零,可以得到注氮管所受应力公式:

$$\sigma_r = - \frac{b^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) p_0 \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = - \frac{b^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) p_0 \quad (4)$$

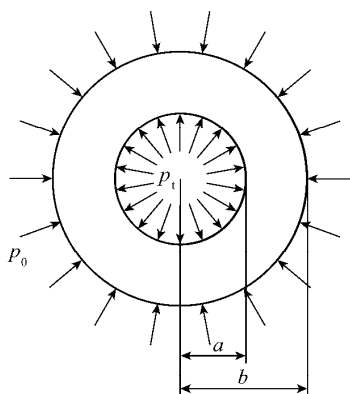


图1 拉梅公式的原理

Fig. 1 Theory of LAME formula

若圆筒只受外部压应力作用,则圆筒剖面上产生的径向应力与切向应力方向相同,则圆筒剖面上所受应力为径向应力与切向应力之和。

$$\sigma = \sigma_r + \sigma_\theta = \frac{2b^2 p_0}{b^2 - a^2} \quad (5)$$

由式(5)可知:内外径之比为固定值的一系列圆管在相同载荷下剖面上的应力分布相同。

计算注氮管表面的压应力为

$$p_0 = -\frac{b^2 - a^2}{2b^2} \sigma \quad (6)$$

则注氮管表面所受压力为

$$Q_0 = p_0 \pi D l = -\frac{(b^2 - a^2)}{2b^2} \sigma \pi D l \quad (7)$$

其中, Q_0 , D , l 分别为注氮管表面受到的压力、注氮管外径、采空区注氮管长度。可得旋转注氮管过程中,减速电机需提供的动力为

$$Q = k Q_0 \mu = -\frac{b^2 - a^2}{2b^2} k \sigma \pi D l \mu \quad (8)$$

式中, μ , k 分别为摩擦因数和安全系数。

3 注氮管表面应力分布模拟

FLAC3D 岩土工程数值模拟软件可以模拟材料的屈服、塑性流动、软化直至大变形,尤其在材料的弹塑性分析、大变形分析以及模拟施工过程等领域有独到的优点^[4]。

3.1 计算模型

以燕子山煤矿 8204 工作面为例,工作面长度为 180 m,进风及运煤巷长度为 1 420 m,回风及运料巷长为 1 324 m,可采走向长度为 1 179 m。该工作面煤层结构复杂,厚度不稳定。煤层厚度为 3.31 ~ 8.05 m,平均为 5.68 m,煤层倾角为 4° ~ 16°,平均 10°,煤层普氏系数为 3。煤层夹石层数为 5 ~ 8 层,0.10 ~ 1.06 m 夹石,夹石的普氏系数为 3.5。建立 400 m × 260 m × 100 m 的计算模型,工作面顶底板岩石物理学参数见表 1。

表1 顶底板岩石物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock

名称	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	密度/(kg·m ⁻³)
泥沙交互层	0.583	0.189	33	1.50	1.0	2 400
基本顶	0.744	0.512	37	8.56	3.0	2 500
直接顶	0.633	0.044	32	1.50	1.0	2 400
煤	0.208	0.035	25	1.00	0.1	1 400
直接底	0.694	0.521	38	24.60	3.0	2 600

根据“O”型圈理论,煤层在开挖过程中,中部变形较大,所以网格划分过程中遵循外围稀疏、中部密集的原则,如图 2 所示。注氮管外径为 80 mm,壁厚 10 mm,根据拉梅公式可知,内外径之比为固定值的一系列圆管在相同载荷下表面上所受应力分布相同。为了使模拟结果更准确,取注氮管外径为 4 m,壁厚为 0.5 m,如图 3 所示,其力学参数见表 2。

3.2 地应力初始化

3.2.1 侧压系数的选取

影响地应力状态的因素有很多,其中岩性与岩石强度是主要因素。一般情况下垂直应力等于岩体自重,即可作为一个主应力,另两个水平主应力也可作为主应力。相关统计资料表明:浅部侧压系数变化范

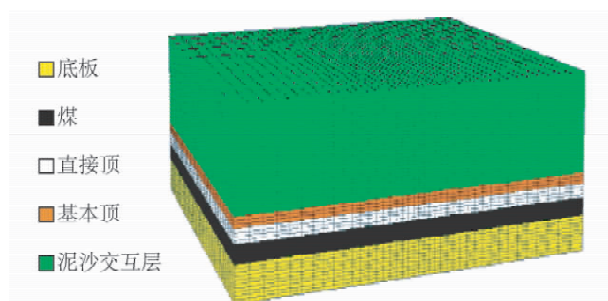


图2 工作面计算模型

Fig. 2 Calculation model of workface

围大,越往浅部,总体上量值也越大,在埋深 500 m 范围内,受断层、裂隙和构造等因素影响,侧压系数测值分散,主要受水平方向的应力;而越往深部侧压系数



图3 注氮管计算模型

Fig. 3 Calculation model of nitrogen injection pipe

表2 注氮管力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of nitrogen injection pipe

体积模 量/GPa	弹性模 量/GPa	剪切模 量/GPa	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比
133	200	80	7 850	0.25

则持续减小,波动范围也减小,总体上呈向静水压力状态过渡的趋势。燕子山煤矿中岩体的岩性以岩浆岩为主,埋深为 321 ~ 440 m(平均埋深 380 m),侧压系数集中在 1.2 ~ 1.4 内^[11-12]。选取测压系数为 1.4。

取上覆岩层容重 $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$,埋深 $H = 380 \text{ m}$,计算得出自重应力为

$$\sigma_z = \gamma H = 27 \times 380 = 10\,260 \text{ kPa} = 10.26 \text{ MPa}$$

水平应力为

$$\sigma_x = \sigma_y = \lambda \sigma_z = 1.4 \times 10.26 \text{ MPa} = 14.364 \text{ MPa}$$

3.2.2 地应力的初始化

常规使用的初始应力场的生成方法是弹性求解法,是指将材料本构模型设置为弹性模型,并将体积模量与剪切模量设置为最大值,然后求解生成初始地应力场,此种方法常用于浅埋工程数值模拟时的初始地应力场的生成。

在深埋工程中,初始地应力场通常为构造应力场和自重应力场的叠加。在 FLAC3D 中,边界条件的定义中并无通常的边界条件,而是速度边界条件,即通过模型边界节点中的速度来实现边界条件的控制。针对这一问题,深埋工程中常使用快速应力边界法(S-B)来模拟初始地应力场。具体思路是:在初始地应力场的生成过程中,数值模型不设速度边界条件,仅在模型表面根据地应力场的分布情况施加应力边界条件并保持恒定。在模型表面施加的应力边界可以认为是模型最外层单元收到的应力,这一应力转化成节点力作用在模型最外层节点上^[13-14]。

燕子山煤矿 8024 工作面平均埋深为 380 m,处于深埋工程与浅埋工程深度范围之间,所以地应力场的初始化需综合采用弹性求解法与快速应力边界法来初始化地应力场,结果如图 4 所示。

3.3 模拟结果

模型开挖过程以 20 m 为步距,沿水平方向上分别留有 40 m 的保护煤柱,在计算过程中监测并记录

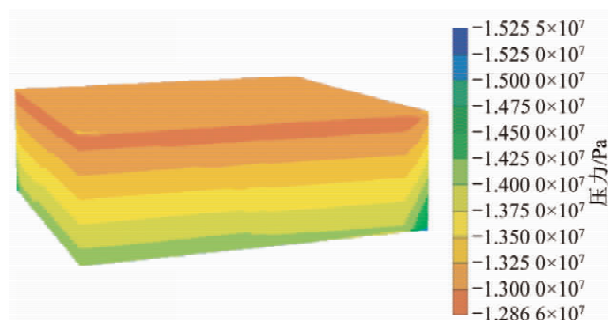


图4 水平方向上的初始地应力场

Fig. 4 Initial geostress field on horizontal direction

体系的最大不平衡力,判断计算模型是否达到平衡。模型若达到平衡后,进行下一步距的开挖。模拟体系的收敛指标采用相对收敛标准,即当体系最大不平衡力与典型内力的比率 R 小于定值 10^{-5} 时,认定模型达到平衡状态,计算即行终止;模拟计算结束后,采空区注氮管末端断面所受应力分布结果如图 5,6 所示。

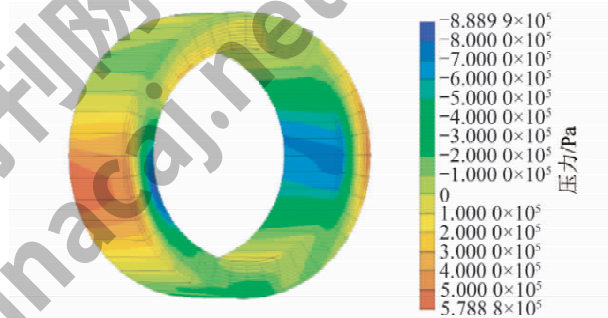


图5 注氮管末端断面沿竖直方向上的应力分布

Fig. 5 End element stress distribution on vertical direction of nitrogen injection pipe

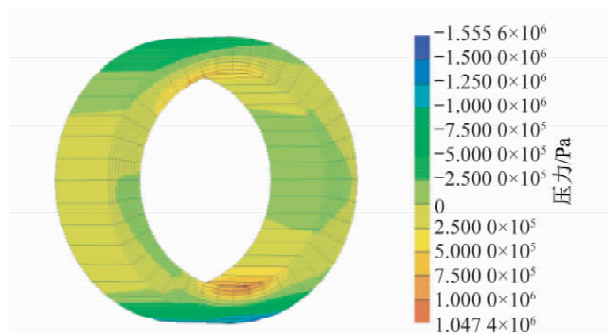


图6 注氮管末端断面沿水平方向上的应力分布

Fig. 6 End element stress distribution on horizontal direction of nitrogen injection pipe

由图 5,6 可知,注氮管所受应力主要由两部分组成:

- (1) Y 方向上的水平压应力;
- (2) Z 方向上铅直压应力。

这主要是由于煤层开挖后,采空区注氮管受力状态由三向应力转变为二向应力;而且由图可知 Y 方向上的水平压应力起主导作用。

因为随着工作面的持续推进,采空区逐步压实,注氮管末端承受的上覆岩层的载荷最大,从而所受应力最大。注氮管末端所受应力主要来源于方水平向上的应力载荷,由图 5,6 可知,注氮管的顶部、底部及两侧会出现应力集中。

在模拟过程中,计算为计算模型中每个单元自动编 ID 号,注氮管管壁末端各单元 ID 编号,如图 7 所示,提取注氮管管壁各单元内部各个方向上的应力值,绘制散点图,如图 8 所示。

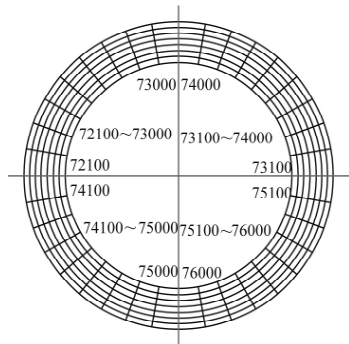


图 7 注氮管末端单元编号

Fig. 7 End section element number of nitrogen injection pipe

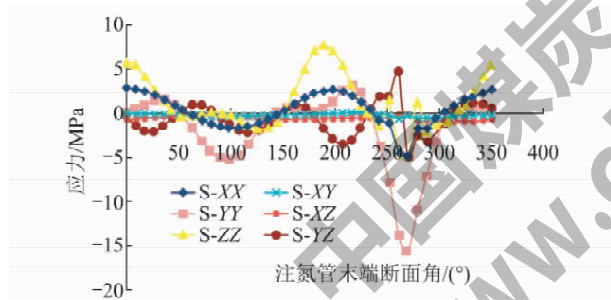


图 8 注氮管管壁末端单元应力值散点

Fig. 8 End element stress value of nitrogen injection pipe

纵坐标正值表示拉应力,负值表示压应力

由图 8 可知,采空区注氮管表面水平方向上所受载荷主要来源于水平方向的压应力,提取注氮管管壁末端各单元模拟结果,可得注氮管管壁水平方向上所受压应力平均值为 1.886×10^5 Pa。

由式(8)可得,旋转注氮管过程中,减速电机需提供的动力计算过程如下。

(1) 水平方向压应力值角度换算。

$$4\sigma(1 + \cos 9^\circ + \cos 18^\circ + \cos 27^\circ + \dots + \cos 81^\circ) = 40 \times 1.886 \times 10^5 \text{ Pa}$$

得:

$$\sigma = 2.752 \times 10^5 \text{ Pa}$$

(2) 注氮管表面的压应力值计算。

$$p_0 = \frac{(b^2 - a^2)\sigma}{2b^2} = 60.2 \text{ kPa}$$

(3) 注氮管表面所受的压力计算。

取注氮管长度 $l = 50 \text{ m}$,则整个注氮管所受的载荷为

$$Q_0 = p_0 \pi D l = 50 \times 3.14 \times 0.08 \times 60.2 = 756.112 \text{ kN}$$

(4) 装置所需动力的计算。

取注氮管表面与岩石的滑动摩擦因数取 0.4,则转动注氮管所需动力值为

$$F = \mu Q_0 = 756.112 \times 0.4 = 302.4 \text{ kN}$$

取安全系数 $k = 1.1$,则转动注氮管所需动力值为

$$F_d = kF = 1.1 \times 302.4 = 332.64 \text{ kN}$$

所需转矩值为

$$T = F r = 332.64 \times 0.04 = 13.306 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

4 结 论

(1) 根据钢管的抗剪切能力优于抗拉能力这一原理,设计了旋转牵引方式的非间隔式注氮防火装置;

(2) 提出了非间隔式注氮防火装置的具体设计方案及工艺过程;

(3) 基于弹性力学解决平面问题的相关原理,提出了非间隔式注氮防火装置动力参数的计算方法;

(4) 以燕子山矿为例,利用岩土工程数值模拟软件模拟了采空区注氮管末端单元所受应力的分布状态;

(5) 依据模拟结果,计算出燕子山矿实施非间隔式注氮防火工艺所需的动力值。

参考文献:

- [1] 黄文清. 注氮防火工艺在综放工作面的应用 [J]. 煤炭技术, 2009, 28(2): 102-103.
Huang Wenqing. Application of fire prevention technology with nitrogen injection at fully mechanized face with caving of roof coal [J]. Coal Technology, 2009, 28(2): 102-103.
- [2] 杨志功, 穆守丽. 综采放顶煤工作面采空区注氮防火工艺的实践 [J]. 煤矿安全, 2008(5): 30-34.
Yang Zhigong, Mu Shouli. Practice of full mechanized gaving face gob nitrogen injection fire prevention technology [J]. Safety in Coal Mines, 2008(5): 30-34.
- [3] 吴玉国, 郭剑明, 张东坡, 等. 综放工作面连续注氮下采空区气体分布及“三带”变化规律 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(6): 964-967.
Wu Yuguo, Wu Jianming, Zhang Dongpo, et al. Air and “three zone” distribution in goaf under continuous nitrogen injection condition of working face [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(6): 964-967.
- [4] 于雅文, 王江, 朱大志, 等. 拖管注氮工艺在大兴煤矿的成功应用 [J]. 煤矿安全, 2010(6): 36-38.

- Yu Yawen, Wang Jiang, Zhu Dazhi, et al. The successful application of the towed tube nitrogen injection in Daxing Coal Mine [J]. Safety in Coal Mines, 2010(6): 36-38.
- [5] 范慕辉, 焦永树. 材料力学教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [6] 戴少度. 材料力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [7] 王焕定, 章梓茂, 景 瑞. 结构力学(第3版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [8] 韩江水, 屈钧利. 弹性力学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [9] 陆明万, 罗学富. 弹性理论基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [10] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [11] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [12] 景 锋, 边智华, 陈 昊, 等. 不同岩性侧压系数分布规律的统计分析 [J]. 长江科学院院报, 2008, 25(4): 48-51.
Jing Feng, Bian Zhihua, Chen Hao, et al. Statistical analysis of lateral pressure coefficient distribution law for different lithologies [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(4): 48-51.
- [13] 胡国伟, 靳钟铭. 基于 FLAC3D 模拟的大采高采场支承压力分布规律研究 [J]. 山西煤炭, 2006, 26(2): 10-12.
Hu Guowei, Jin Zhongming. Research on distribution laws of abutment pressure in large mining height workface by FLAC3D Simulation [J]. Shanxi Coal, 2006, 26(2): 10-12.
- [14] 刘社育. 断层影响区域回采巷道围岩运动特征及控制技术研究 [J]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2007.
- [15] 来兴平, 伍永平, 蔡美峰, 等. FLAC 在地下巷道离层破坏非线性数值模拟中的应用 [J]. 西安科技学院学报, 2000, 20(3): 193-195.
Lai Xingping, Wu Yongping, Cai Meifeng, et al. Application of FLAC in nonlinear numerical simulation of underground tunnels overburden bed separation grouting damage [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2000, 20(3): 193-195.
- [16] 曾 垒, 项一凡. 用 FLAC3D 实现综放工作面三维矿压模拟的探讨 [J]. 煤炭工程, 2007(6): 86-88.
Zeng Lei, Xiang Yifan. Research on mine working face pressure simulation of three-dimensional by FLAC3D simulation [J]. Coal Engineering, 2007(6): 86-88.

2012 年《Journal of Coal Science & Engineering (China) 》征订启事

由中国煤炭学会主办《煤炭学报》编辑部编辑出版的《Journal of Coal Science & Engineering (China) 》英文刊是向国内外公开发行的煤炭科学技术方面的综合性学术刊物。主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护等方面的科学研究成果论著和学术论文,以及煤矿生产建设、企业管理经验的理论总结,也刊载重要学术问题的讨论及国内外煤炭科学技术方面的学术活动简讯。

《Journal of Coal Science & Engineering (China) 》是向世界传播我国煤炭科学技术的重要媒体,对加强中外科学技术交流,宣传我国煤炭科学成就,提高我国煤炭科学技术的国际地位将起到重要的作用。及时报道我国煤炭科技新理论、新技术、新经验也是英文刊的主要任务。英文刊《Journal of Coal Science & Engineering (China) 》和中文刊《煤炭学报》具有不同的刊登内容和各自的特点。

《Journal of Coal Science & Engineering (China) 》为季刊,每期 112 页,每册国内订价 28 元,全年共收费 112 元。订阅者可直接和本编辑部联系,订单函索即寄,编辑部随时办理订阅手续。

本刊地址: 北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部 邮政编码: 100013

联系电话: (010) 84262930-804 联系人: 毕永华

E-mail: mtxbbyh@126.com