

# 动压软岩巷道钢管混凝土支架支护围岩稳定性分析

李学彬, 高延法, 黄万朋, 王正泽, 何晓升, 田甜, 张西忠

中国矿业大学(北京), 北京 100083

**摘要** 南山矿-225 机道距离 18 煤工作面地板的距离小于 5.8m, 受回采动压影响明显, 采用了高强度钢管混凝土支架进行巷道支护, 高强度钢管混凝土支架的主体钢管为  $\phi 159\text{mm} \times 8\text{mm}$  的无缝钢管, 内部充填混凝土采用 C40 强度标准, 通过理论计算可得钢管混凝土支架的极限承载能力为 1894.3kN, 并结合 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟和现场监测分析 18 煤工作面回采对-225 机道表面位移和围岩应力状态的影响。研究表明, 距离工作面 30m 的范围内围岩受 18 煤工作面回采动压影响明显, 最大垂向应力为 27.4—42.9MPa, 应力集中系数为 2.27—3.57; 钢管混凝土支架支护下动压巷道-225 机道表面位移小于 20mm, 满足现场巷道围岩稳定性要求。

**关键词** 回采动压; 钢管混凝土支架; FLAC<sup>3D</sup>; 现场监测

**中图分类号** TD353

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.16.005

## Analysis on Surrounding Rock Stability of Soft Rock Roadway Supported by Steel Tube Confined Concrete Supports During Mine Dynamic Pressure

LI Xuebin, GAO Yanfa, HUANG Wanpeng, WANG Zhengze, HE Xiaosheng, TIAN Tian, ZHANG Xizhong

China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

**Abstract** The distance between -225 roadway and 18 coal working face floor in Nanshan Mine is less than 5.8m, which is affected by the dynamic pressure of 18 coal face's recovery with a significant mine strata pressure behavior. High strength steel tube confined concrete supports (STCCS) are adopted with the main steel tube of high-strength STCCS and  $\phi 159\text{mm} \times 8\text{mm}$  steel seamless pipe, with the internal filled core concrete of C40 strength standard, and with the ultimate bearing capacity of STCCS of 1894.3kN, according to a theoretical calculation. With the FLAC<sup>3D</sup> numerical simulation and the in-situ monitoring, the influence of 18 coal face's recovery on the surface displacement and the stress state of -225 roadway surrounding rock is analyzed. The results show that the mine strata pressure behavior is significant in the scope of 30m to the working face during the mine dynamic pressure of the 18 coal face's recovery, the maximum vertical stress is 27.4 to 42.9MPa, and the stress concentration factor is 2.27 to 3.57. The surface displacement of -225 roadway surrounding rock is less than 20mm when it is supported by STCCS, which meets the stability requirements of the roadway surrounding rock.

**Keywords** mine dynamic pressure; STCCS; FLAC<sup>3D</sup>; in-situ monitoring

### 0 引言

采场底板巷道在开采过程中要经历一个动压作用过程, 巷道压力显现大, 变形严重, 呈现软岩巷道变形特征<sup>[1-5]</sup>, 是煤矿生产中的一大技术难题。而回采巷道稳定性是一个复杂的

空间问题。巷道围岩稳定性受到多方面因素影响, 但主要影响因素包括围岩应力、围岩强度和支护手段<sup>[6-10]</sup>。

钢管混凝土是在钢管外壳内填充混凝土组成的现代构件<sup>[11]</sup>, 其工作原理是钢管壳约束作用使混凝土处于三向受压

收稿日期: 2012-03-06; 修回日期: 2012-05-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB209405); 国家自然科学基金项目(51034003); 《科技导报》博士生创新研究资助计划项目(kjdb201001-10)

作者简介: 李学彬, 博士研究生, 研究方向为巷道支护, 电子邮箱: lixuebin152@163.com

状态,从而使夹心混凝土具有更高的抗压强度,内填混凝土与钢管壳共同承受轴向压力。钢管混凝土支架是一种近年来研发成功的新型高强度支架,在软岩巷道支护中,钢管混凝土支架能够提供较强的支护反力,控制巷道变形,维持巷道稳定<sup>[12-14]</sup>。

225 机道位于南山矿盆底北翼区 18 层一分段下顺槽正下方,原有支护方式为锚喷网索支护,巷道围岩软弱破碎程度大,同时由于 18 煤工作面开采使-225 机道巷道围岩压力显现明显,巷道支护困难。采用高强度的钢管混凝土支架进行巷道支护,本文通过 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟分析和现场监测数据分析动压破碎围岩巷道-225 机道的稳定性,为以后动压巷道支护提供理论支持和技术指导。

### 1 -225 机道破坏特征及分析

#### 1.1 支承压力分析

18 煤工作面回采对下部-225 机道有动压影响,且围岩破碎。在钢管混凝土支架支护段,18 煤层底板距离-225 机道顶板的最小距离为 3.9m,最大距离为 5.8m。所以当 18 煤工作面推进到此段时,动压影响更为剧烈。

回采工作面围岩支承压力的分布曲线如图 1<sup>[1]</sup>。其中, $\gamma H$  为原岩应力大小; $K, K_1, K_2$  为工作面围岩应力集中系数,一般取 1.5—3.0,根据顶底板围岩的地质条件确定; $a, a_1$  段为支承压力峰值距煤壁的距离,一般为 3—5m; $b, b_1$  段为支承压力的影响范围,一般为 20—40m; $c$  段为原岩应力区。

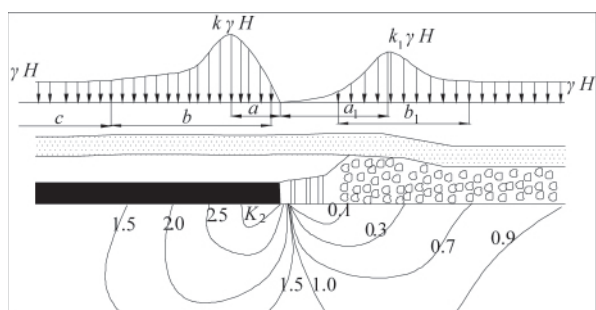


图 1 回采工作面围岩支承压力分布

Fig. 1 Support pressure distribution of coal mining face

#### 1.2 -225 机道破坏特征

-225 机道围压破碎程度大,原有支护方式为锚喷网索支护,由于随着 18 煤工作面的推进,锚索露出导致锚索失效,同时超前支承压力通过煤层底板传递到-225 机道顶板,巷道围岩垂向地应力增大,顶板下沉量较大,如图 2 所示,巷道稳定性较差,影响巷道的正常使用。

### 2 -225 机道的工程地质概况

-225 机道位于南山矿盆底北翼区 18 层一分段下顺槽正下方,18 煤工作面与-225 机道顶板距离较近,钢管混凝土支



图 2 18 煤工作面回采后巷道破坏图

Fig. 2 Roadway failure state after 18 coal face's recovery

架支护段的距离在 3.5—4.8m 之间,煤仓位于支护段中间,如图 3 所示,地质柱状如图 4。采面临近、经过及远离的期间-225 机道都会有严重的动压影响。为了保证巷道及煤仓的稳定性,应采取高强度的巷道支护措施。

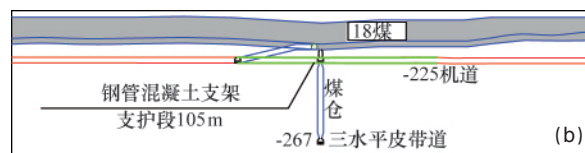
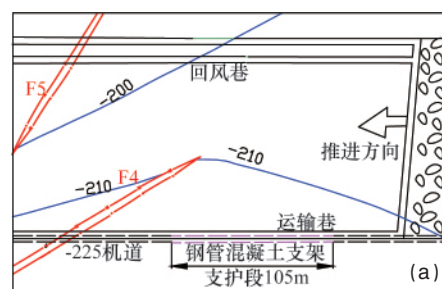


图 3 三水平-225 机道平面(a)和剖面(b)

Fig. 3 Planar graph (a) and profile (b) of -225 roadway in the third level

地层		柱状	岩性	层厚/m	岩性描述
系	统组				
侏罗系	上侏罗组	—	粉砂岩	4.1	水平层理
		—	中砂岩	3.2	
		—		11.9	缓波状,斜层理以石英为主
		—	中砂岩	15.1	分选不均,直线形斜层理以石英为主
		—	18-1煤	3.95	
		—	粉砂岩	1.19	
		—	18-2煤	14.66	该煤层中夹石可达 15—20m厚,有灰质砂岩
		—	粉砂岩	2.02	
		—	粗砂岩	10.67	成分以石英为主
		—	细砂岩	1.52	
—	—	中砂岩	16.46	分选不均,波状斜层理,以石英为主	

图 4 -225 机道地质柱状图

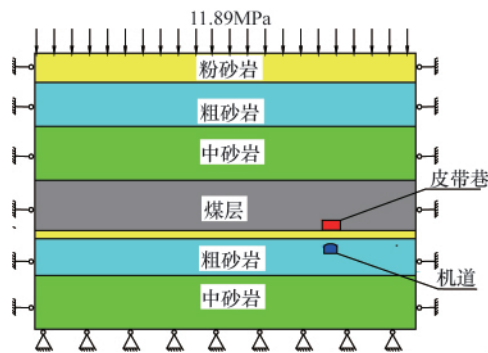
Fig. 4 Geological histogram of -225 roadway

### 3 动压-225 机道围岩稳定性数值分析

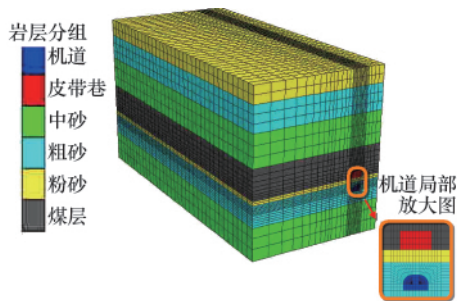
#### 3.1 力学模型建立

##### 3.1.1 -225 机道围岩模型

-225 机道埋深为 535m,本次计算选取模型计算水平为-245—-170 水平。力学模型的大小为 140m×84m×75m(长×宽×高),三维模型网格共划分有 57330 个单元和 61334 节点。模型的 x 方向边界、y 方向边界均施加水平位移约束条件,约束边界水平方向的位移,模型的底边界施加垂直位移约束条件约束边界垂直方向的位移。模型上部为自由边界,施加应力边界条件,模拟上覆岩层的自重,该模拟计算施加  $\sigma_z=11.89\text{MPa}$ ,如图 5 所示。



(a)



(b)

图 5 -225 机道力学模型 (a)和三维网格划分图 (b)

Fig. 5 Mechanical model (a) and three-dimensional grids of the numerical model (b) of -225 roadway

破坏准则选择 Mohr-Coulomb 准则<sup>[15-18]</sup>,岩层参数见表 1。

表 1 围压岩层参数

Table 1 Surrounding rock strata parameters

岩层名称	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/GPa	泊松 比	内聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)	抗拉强 度/MPa
粗砂岩	2540	10	0.21	4.5	40	1.58
中砂岩	2610	7.22	0.135	2.06	41	1.32
粉砂岩	2640	4.8	0.19	2.75	38	1.56
煤层	1800	1.98	0.45	1.0	32	1.06
注浆围岩	2500	10	0.21	5.5	42	1.86

##### 3.1.2 -225 机道支护参数

由于-225 机道距离 18 煤工作面下顺槽底板较近,3.5—4.8m,不宜挑顶,同时为提高断面利用率,采用变梯形断面。

钢管混凝土支架的主体钢管选用  $\phi 159\text{mm}\times 8\text{mm}$  的无缝钢管,排距为 0.8m,内部充填混凝土采用 C40 强度标准,混凝土喷层为 100mm,喷射砼强度等级为 C20,并辅助围岩注浆,如图 6 所示。

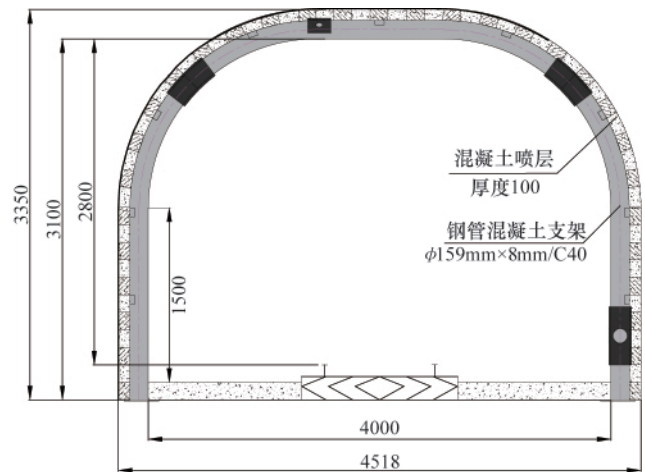


图 6 -225 机道断面支护参数图 (单位: mm)

Fig. 6 Section supporting parameters of -225 roadway (unit: mm)

##### 3.1.3 钢管混凝土支架极限承载能力计算

钢管混凝土是在钢管中充填混凝土制成的组合结构材料。以  $\phi 159\text{mm}\times 8\text{mm}$  的钢管混凝土轴心受压短柱为例,根据极限平衡理论得出钢管混凝土短柱的极限承载力为  $N_0=A_c f_c(1+\sqrt{\theta}+1.1\theta)=2228.6\text{kN}$ ,其中,  $N_0$  为短柱极限荷载;  $\theta$  为套箍指标,  $\theta=\frac{A_s f_s}{A_c f_c}=2.49$ ;  $A_s f_s$  分别为钢管的横截面积、钢管管材的屈服强度;  $A_c f_c$  分别为内填混凝土横截面面积、混凝土的抗压强度,如表 2。

表 2 圆钢管混凝土短柱试件承载力理论值

Table 2 Theoretical bearing capacity for concrete filled steel tube short column

钢管型 号/mm	钢管屈服 强度/MPa	混凝土 抗压强 度/MPa	钢管横 截面积 /mm <sup>2</sup>	混凝土 横截面 积/mm <sup>2</sup>	套箍 指标	极限 承载 力/kN
159×8	275	26.1	3795	16061	2.49	2228.6

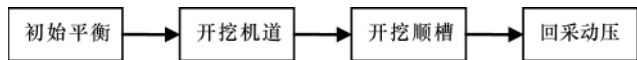
实际中,构件往往考虑稳定系数  $\varphi$ ,以此确定轴压稳定承载力,稳定系数  $\varphi$  计算复杂,根据实际长细比  $\lambda$  与构件弹性失稳的界限长细比  $\lambda_p$ 、弹塑性失稳的界限长细比  $\lambda_0$  不同关系最小而确定的,通过比较可知  $\lambda < \lambda_p < \lambda_0$ ,所以  $\varphi=a\lambda^2+b\lambda+c=$

0.85,故轴压稳定承载力: $N=\varphi N_0=1894.3\text{kN}$ 。

-225 机道  $\phi 159\text{mm}\times 8\text{mm}$  钢管混凝土支架极限承载能力为 1894.3kN,数值模拟采用梁单元模拟钢管混凝土支架。

### 3.2 数值模拟结果分析

在数值模拟过程中,采用大变形模式求解计算,模拟过程如下:



#### 3.2.1 回采至监测点过程中围岩稳定性分析

18 煤工作面回采过程中-225 机道表面收敛曲线如图 7,在 18 煤工作面回采至监测点的过程中,距工作面 30m 内处,巷道表面收敛速度加剧,距工作面 5m 时测点应力处于巷道动压应力极值点,巷道表面位移量均达到拐点,顶板位移值为 16.9mm,底板位移值为 12.2mm,两帮位移值为 7.5mm,之后,随着工作面推进,巷道围岩变形量几乎没有变化。在煤柱侧 17—25m 区域内形成应集中区,垂向应力最大值为 42.9MPa,应力集中系数最大值为 3.57。同时在工作面推进方向上 15—25m,形成应力集中区域,垂向应力最大值为 27.4MPa,应力集中系数最大值为 2.27。-225 机道煤柱侧围岩应力值略高,垂向应力最大值为 24.24MPa,应力集中系数为 2.02,如图 8(a)所示。

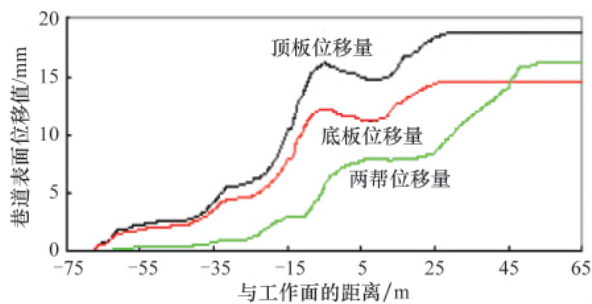


图 7 18 煤工作面回采过程中-225 机道表面位移曲线  
Fig. 7 Displacement curve of -225 roadway surrounding rock during the 18 coal face's recovery

#### 3.2.2 回采过监测点后围岩稳定性分析

18 煤工作面回采过监测点后,当工作面与监测点 15—30m 距离范围内,顶底板位移量又开始明显增加,顶板位移到达极值 18.7mm,底板位移量到达极值 14.5mm,之后煤帮位移量随着工作面推进不断增加直至 50m 后煤帮到达极值 16.3mm,如图 7 所示。工作面回采后在煤柱 16—26m 处形成应力集中区,应力极值为 39.16MPa,应力集中系数极值为 3.0,工作面回采在下顺槽围岩周围形成椭圆形应力降低区,由于-225 机道与下顺槽距离仅为 4m,正好处于工作面回采后形成的应力降低区内,机道煤柱侧围岩应力值略高,应力极值为 17.37MPa,应力集中系数为 1.44,如图 8(b)所示。

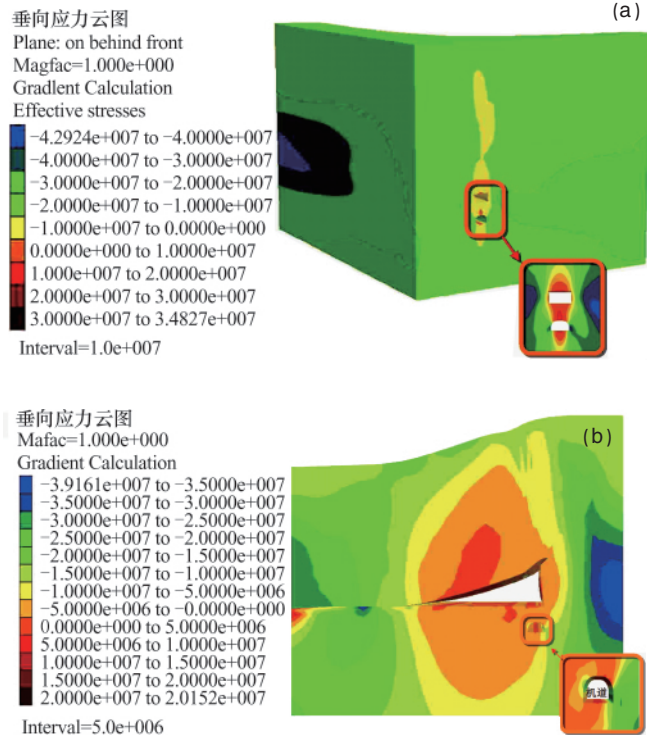


图 8 18 煤工作面回采前 (a) 和回采后 (b) 工作面围岩垂向应力云图

Fig. 8 Surrounding rock's vertical stress before (a) and after (b) the 18 coal face's recovery

## 4 现场监测分析

完整的现场监测资料可以为巷道支护的成功实施提供基础数据,是巷道支护工程得以巩固和发展的重要保证。其主要目的在于:(1) 掌握巷道围岩的变形规律性,为巷道支护提供科学依据;(2) 监控巷道支护的施工质量,对支护状况进行跟踪反馈和预测,及时发现工程隐患,以保证施工安全和软岩巷道稳定。

### 4.1 现场监测内容

#### (1) 巷道变形监测

巷道变形观测主要包括:工作面回采动压影响下顶底板移近量、两帮移近量和底板腰线移近量,如图 9 所示。

#### (2) 巷道围岩应力监测

在巷帮中打深度 2m 的专用钻孔,采用矿用钻孔应力计监测-225 机道围岩应力的变化。

### 4.2 现场监测数据分析

#### 4.2.1 巷道表面位移量分析

距离工作面较远时巷道表面位移量较小,当工作面推进至监测点 30m 内时巷道位移程度明显增加,直至推过观测点 20—30m 后巷道变形程度明显降低,巷道两帮位移量为 16.2mm,顶板位移值为 18mm,底板位移值为 14mm,巷道表面收敛监测数据如图 10 所示。

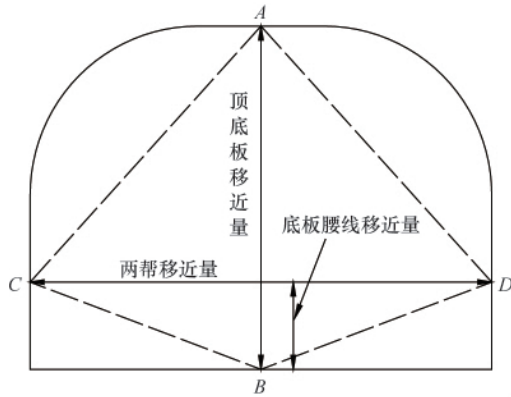


图9 巷道表面位移监测

Fig. 9 The monitoring displacement of the roadway surrounding rock

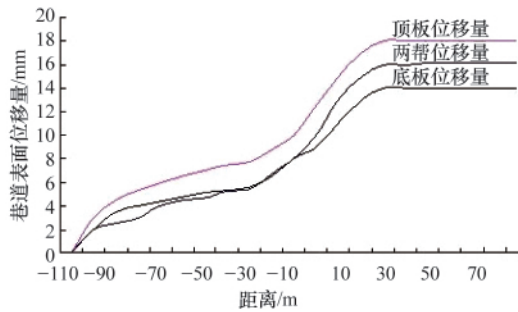


图10 工作面推进距离与巷道表面位移的关系

Fig. 10 Relationship between the advance distance of the working face and the displacement of the roadway surface

#### 4.2.2 巷道围岩应力变化分析

18煤工作面推进至监测点30m内, 钻孔应力值变化不大, 维持12MPa左右, 当工作面回采至20m后, 应力值明显增加至极值24.63MPa, 应力集中系数为2.05, 之后应力值维持24MPa左右直至工作面推过监测点20m后, 应力值开始下降至12MPa左右, 如图11所示。

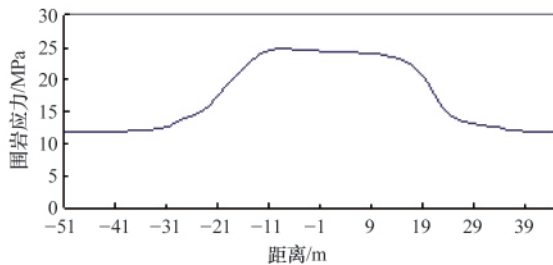


图11 钻孔应力值与工作面距离的关系

Fig. 11 Relationship between the borehole stress and the workface distance

## 5 结论

-225机道围岩破碎, 且18煤工作面回采后, 围岩垂向应力急剧增加, 围岩变形量大, 巷道支护困难, 属于典型动压软

岩巷道, 采用高强度钢管混凝土支架支护, 通过数值模拟和现场监测可知, 钢管混凝土支架支护维持巷道稳定。主要结论如下。

(1) 高强度钢管混凝土支架的主体钢管为 $\phi 159\text{mm} \times 8\text{mm}$ 的无缝钢管, 内部充填混凝土采用C40强度标准, 通过计算得钢管混凝土支架的极限承载能力为1894.3kN。

(2) 18煤工作面回采过程中, 采场前方煤层和工作面两侧煤柱15—25m处形成应力集中区, 应力集中系数为2.273.57。同时, 距离测站前后30m的范围内, 巷道矿压显现明显, 巷道位移量明显增加, 进而推断18煤工作面回采动压的影响范围是距离工作面30m的范围内。

(3) 18煤工作面回采动压影响下-225机道表面位移极值较小, 顶板位移极值为18—18.7mm, 巷道底板位移极值为14—14.5mm, 巷道两帮位移16.2—16.3mm, 巷道已经经受动压考验, 满足了巷道围岩稳定的要求。

## 参考文献 (References)

- [1] 宋振骥. 实用矿山压力控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988.  
Song Zhenqi. Applied controlling of mine pressure [M]. Xu Zhou: China University of Mining and Technology Press, 1988.
- [2] 陈炎光, 陆士良. 中国煤矿巷道围岩控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.  
Chen Yanguang, Lu Shiliang. Control of surrounding rock of coal roadways in China [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1994.
- [3] 王连国, 缪协兴, 董建涛. 动压巷道锚注支护数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 39—42.  
Wang Lianguo, Miao Xiexing, Dong Jiantao. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2006, 23(1): 39—42.
- [4] 张华磊. 采场底板应力传播规律及其对底板巷道稳定性影响研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2011.  
Zhang Hualei. Study on stress transmission laws of mining floor and its influence on stability of floor roadway [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2011.
- [5] 刘文朝. 采动影响下破碎围岩巷道注浆加固支护技术[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(6): 17—20.  
Liu Wenchao. *Coal Science and Technology*, 2009, 37(6): 17—20.
- [6] 英国梁, 王国栋, 窦波洋, 等. 深井高应力非常规断面动压巷道支护技术研究[J]. 中国矿业, 2009, 18(4): 70—73.  
Ying Guoliang, Wang Guodong, Dou Boyang, et al. *China Mining Magazine*, 2009, 18(4): 70—73.
- [7] 谢文兵, 史振凡, 殷少举. 近距离跨采对巷道围岩稳定性影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 1986—1991.  
Xie Wenbing, Shi Zhenfan, Yin Shaoju. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(12): 1986—1991.
- [8] 颜立新, 赵军. 多次动压影响巷道支护技术及护巷煤柱留设 [J]. 煤矿开采, 2009, 14(1): 60—63.  
Yan Lixin, Zhao Jun. *Coal Mining Technology*, 2009, 14(1): 60—63.
- [9] 杨军. 济宁二矿深部回采巷道破坏机制及支护对策 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2007.  
Yang Jun. Study of deep drawing roadway destruction mechanism and support countermeasure in Jining coal mine No. 2 [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2007.

- [10] 张百胜, 杨双锁, 康立勋, 等. 极近距离煤层回采巷道合理位置确定方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 97-101.  
Zhang Baisheng, Yang Shuangshuo, Kang Lixun, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(1): 97-101.
- [11] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构 (修订版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.  
Cai Shaohuai. *Modern steel tube confined concrete structures (Revised Edition)*[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [12] 高延法, 王波, 王军, 等. 深井软岩巷道钢管混凝土支护结构性能试验及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增 1): 2604-2609.  
Gao Yanfa, Wang Bo, Wang Jun, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(Supp.1): 2604-2609.
- [13] 王波. 软岩巷道变形机理分析与钢管混凝土支架支护技术研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2009.  
Wang Bo. *Analysis on the laws of tunnel deformation in soft rock and the supporting technology of concrete-filled steel tube support* [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2009.
- [14] 高延法, 王波, 曲广龙, 等. 钢管混凝土支架力学性能实验及其在巷道支护中的应用[C]. 第八届海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会, 中国台北, 2009, 11: C15-1-C15-10.  
Gao Yanfa, Wang Bo, Qu Guanglong, et al. *Experimental mechanical properties of steel tube confined concrete and application in the roadway* [C]. Eighth strait tunnel and underground engineering of academic and technical seminars. Taipei, 2009. 11: C15-1-C15-10.
- [15] 王连国, 张志康, 张金耀, 等. 应力复杂煤层沿空巷道锚注支护数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26 (2): 145-149.  
Wang Lianguo, Zhang Zhikang, Zhang Jinyao, et al. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2009, 26(2): 145-149.
- [16] 李学彬, 曲广龙, 黄万鹏, 等. 高支承压力区沿空留巷充填体强化支护的数值模拟研究[J]. 煤矿开采, 2010, 15(6): 48-50, 95.  
Li Xuebin, Qu Guanglong, Huang Wanpeng, et al. *Coal Mining Technology*, 2010, 15(6): 48-50, 95.
- [17] 武景云, 李学彬, 马鹏鹏, 等. 高支承压力区沿空留巷围岩稳定性数值分析[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(6): 23-26.  
Wu Jingyun, Li Xuebin, Ma Pengpeng, et al. *Coal Science and Technology*, 2010, 38(6): 23-26.
- [18] Itasca Consulting Group. FLAC3D (fast lagrangian analysis of continua in three-dimensions. version 2.1, user manual [Z]. FLAC Consulting Group Inc., 2002.

(责任编辑 丁佐奇, 岳臣)

· 学术动态 ·

## “2012 年全国博士生论坛 (多孔介质流动)”征稿

“2012 年全国博士生论坛(多孔介质流动)”将由中国石油大学(华东)主办, 拟定于 2012 年 8 月 18—19 日在青岛市举行。

征文范围:(1) 资源与能源开发(石油、天然气、地热、核能等);(2) 工程技术(地下水、岩土、水力、电力)中的多孔介质流动问题;(3) 多孔介质中非达西、非牛顿、非等温、非线性流动问题;(4) 多尺度、多场、多相问题流动机理及模拟;(5) 学科交叉渗流问题(生物、环境、化工、医学、物理);(6) 其它多孔介质中流动相关问题。

论文截稿日期: 2012 年 6 月 30 日。

联系电话: 028-6183036、028-61831566。

电子邮箱: isdc@uestc.edu.cn。

会议网站: <http://www.ccse.uestc.edu.cn/ccics2012/>。

### 《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件, 以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等, 撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿, 每篇文章约 2000 字, 同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱: kjdbbjb@cast.org.cn。