

文章编号:0253-9993(2010)04-0541-05

# 深部巷道围岩分区破裂化弹塑脆性分析

陈建功,朱成华,张永兴

(重庆大学 土木工程学院,重庆 400045)

**摘要:**考虑围岩在空间轴对称受力状态下弹性、塑性、脆性状态的转化,提出了深部围岩分区破裂化现象是围岩在特定条件下拉伸破坏与脆性张裂破坏不断重复的结果。分析了巷道围岩的弹塑性应力场,说明了支撑压力线处的环状连续拉伸破坏是分区碎裂化产生的必要条件,并给出了拉伸破坏处的半径公式。结合 Griffith 强度准则,推导了围岩由弹性状态转化为脆性张裂破坏的半径关系式,以此来确定破裂区范围。实例计算结果表明,破裂带的宽度和位置都与现场实际观测结果吻合较好。

**关键词:**深埋巷道;岩石分区碎裂化;深部岩体;弹性、塑性、脆性

**中图分类号:**TU457 **文献标志码:**A

## Elastic-plastic-brittle analysis of zonal disintegration within rock mass in deep tunnel

CHEN Jian-gong, ZHU Cheng-hua, ZHANG Yong-xing

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** Considering the conversion of rock behaviors between elastic, plastic and brittle under space axial symmetrical stress, it was put forward that the essence of zonal disintegration was the repeated alternate emergence of tensile failure and brittle tension crack failure. Tensile failure in the support pressure line was the necessary condition for zonal disintegration formation, and elastic-plastic stress field within rock mass in deep tunnel was analyzed, and a formula to determine the location of tensile failure was put forward. On the basis of the Griffith theory, the relationship between inner and external radius of fractured zone was derived as the behavior of rock turned from elastic to brittle under certain stress condition. The results of calculation are conformity with data of monitoring in-situ.

**Key words:** deep tunnel; zonal disintegration; deep rock masses; elastic-plastic-brittle

在深部岩体中开挖硐室或者巷道时,在其两侧和工作面前的围岩中,会产生交替的破裂区和不破裂区,称这种现象为分区破裂化<sup>[1]</sup>。众多学者从不同的角度对这种现场进行了分析探讨。E. I. Shemyakin等<sup>[2-5]</sup>通过现场量测发现了分区破裂化现象,并进行了试验验证和理论分析,给出了实际应用和计算产生环带状碎裂现象的条件公式。G. D. Adams和A. J. Jager<sup>[6]</sup>在深处采场采用钻孔潜望镜监测到顶板间隔破裂情形。D. F. Malan和S. M. Spottiswoode<sup>[7]</sup>利用已有的相关监测资料,分析了采矿矿场顶板岩层间隔破

裂随时间和采矿活动的发展和形成,同时探讨了矿震与矿场顶板围岩分区破坏的关联性。E. Sellers和P. Klerck<sup>[8]</sup>通过试验研究了深埋隧洞围岩不连续面对间隔破裂的影响作用。M. V. Курленя和B. H. Опарин<sup>[9]</sup>发现各破裂区的半径服从某种规律,给出了各破裂区的半径和厚度表达公式,但该公式仅适用于特定矿区。L. S. Metlov等<sup>[10]</sup>利用非平衡热动力学方程,揭示了围岩分区破裂的物理基础,并进行了计算机模拟。我国也有多位学者对该现象进行了相关研究。钱七虎<sup>[11-12]</sup>研究了深部岩体工程响应的特

征,并且界定了“深部”岩体的范围。李英杰、潘一山等<sup>[13-15]</sup>分别从现场观测、相似材料模拟试验、弹塑性理论、蠕变理论等角度探讨了分区破裂化机理。周小平和钱七虎<sup>[16]</sup>把深部巷道的开挖看作动力问题,运用弹性力学和断裂力学,确定了破裂区岩体的残余强度和产生破裂区的时间,进而确定了破裂区和非破裂区的宽度和数量。顾金才等<sup>[17]</sup>通过模型试验,发现了在平行于硐室轴向的高水平压力作用下,硐室围岩出现多条裂缝,裂缝之间存在未破坏区域,证明了分区破裂化存在的事实。

分区破裂化现象已经引起了许多专家学者的关注,是目前深部工程建设中急需解决的理论和实际问题之一。

上述学者分别从现场监测、模型试验和理论方面分别取得了一些成就,但目前关于深部巷道围岩分区破裂化的研究尚处于初级阶段,其机制尚不清楚。本文认为,国内外现有的讨论存在2个误区:

(1)按照平面应变来考虑问题,忽略巷道轴向方向地应力加载作用下的三维效应;

(2)从动力效应、时间效应及复杂的本构关系来考虑问题,忽视不同应力路径下或应力状态下围岩弹、塑、脆性间的相互转化。

本文试图对深部巷道围岩的弹塑性应力场进行空间轴对称分析,并考虑围岩在不同应力与变形状态下弹性、塑性、脆性状态的转化,对分区破裂化的全过程进行分析。

## 1 分区破裂化的弹、塑、脆性理论解释

岩石的弹性、塑性、脆性并非是其固有性质,而与其受力、变形状态有关,随着围岩受力、变形状态的变化,其弹性、塑性和脆性是可以相互转化的。事实上,在高围岩应力及变形受限的状态下,巷道开挖卸荷后,围岩应力场的重新分布是个动态过程,一旦应力状态达到脆性破坏强度准则时就会从弹性或塑性状态进入脆性破坏状态,从而又使围岩应力得到重新分布,如此重复,产生分区破裂现象。

在岩体内开掘巷道瞬间,围岩暂时处于弹性状态,巷道周边附近岩体出现应力集中,发生脆性的张裂破坏,如图1(a)所示,使这部分岩体完整性降低,由于张裂破坏速度很快,使得张裂区外侧围岩弹性能迅速释放,对张裂区围岩施加压力,使其进入塑性软化阶段,产生剪切延性破坏,此为第1破裂区。这种延性破坏不是瞬时的,存在大量裂缝发展、联合和形成宏观裂缝的过程,需要一个时间段来完成,而且第1破裂区的支撑反力和变形约束作用使外侧围岩逐

渐进入塑性强化阶段,随着围岩弹性能的进一步释放,在围岩的应力重分布过程中,塑性区和弹性区交界线(此处围岩环向、径向压力最大,径向应变最大,称支撑压力线)逐渐后移,塑性区逐渐向深部发展,如图1(b)所示,当支撑压力线处的拉应变达到围岩的极限拉应变时,围岩由塑性转化为脆性而产生拉裂破坏,这种拉裂是一条环带状连续缝,如此又形成新的伪自由工作面,顾金才<sup>[17]</sup>的试验已证实了这一点。这条环状连续缝外侧围岩又会因为应力集中出现弹性转化脆性的张裂破坏,如图1(c)所示,这样重复出现弹性转化脆性的张裂破坏和由塑性转化为脆性的拉裂环状连续缝使得围岩内产生交替的破坏及未破坏区域,即分区破裂化现象。这种现象一直进行到围岩介质内由荷载作用产生的最大径向拉应变值小于围岩的极限拉应变时为止,如图1(d)所示。

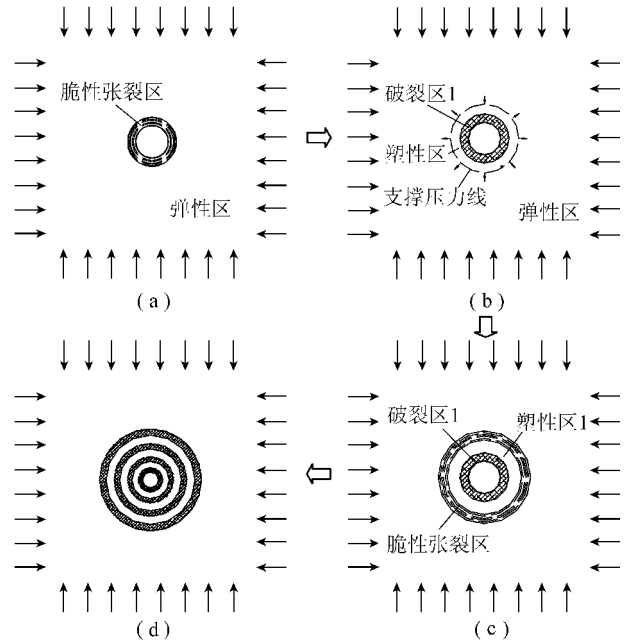


图1 分区破裂化发展过程

Fig. 1 Zonal disintegration process

可以看出,对于浅层巷道,在图1(b)阶段,由于支撑压力线处径向拉应变无法达到最大径向拉应变,塑性强化区完全可以支撑围岩压力,此时围岩由周边到深处可为破碎区、塑性强化区和弹性区等,也就是只有一个破裂区和一个完整区,不会产生分区破裂化现象,浅层巷道围岩状态只不过是深部巷道分区破裂化的一个特例。

## 2 围岩分区破裂化弹、塑、脆性解析分析

### 2.1 巷道开挖瞬间或伪自由工作面外侧围岩的弹性应力场

在巷道开挖瞬间或环状连续缝(伪自由工作面)

产生瞬间,会立刻发生弹性变形,围岩应力重新分布。弹性变形的特点是位移量级小(以 mm 计),完成速度快(以声速计)。设巷道为深埋圆形平巷,半径(或伪自由面半径)为  $R$ ,无限长,原岩应力各向等压  $p_0$ ,内壁受到支撑反力为  $p_1$ ,围岩为各向同性的均质体,由于模型及荷载皆是轴对称的,故认为硐周围岩的应力也是轴对称分布,可以把问题看作是一个空间轴对称问题。选用柱坐标,以压应力为正,围岩应力分布按弹性理论求解,如图 2 所示。在求解时,可分解为 2 个部分:①沿硐室轴线方向荷载引起的,用上标“'”表示;②由  $x, y$  方向的荷载引起的,用上标“''”表示,围岩应力为 2 部分之和。 $\sigma_z, \sigma_r, \sigma_\theta$  分别为围岩轴向、径向、环向应力。

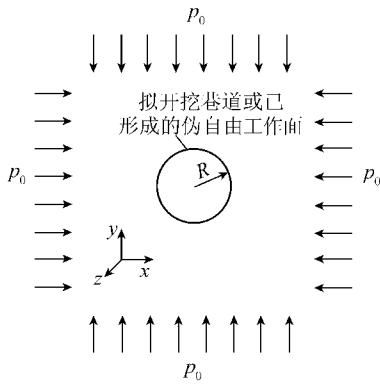


图 2 弹性应力场计算模型

Fig. 2 Calculation model of elastic stress field

由弹性力学,第 1 部分的主应力解分别为

$$\sigma'_r = \frac{\nu}{1-\nu} p_0 \left( 1 - \frac{R_0^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma'_\theta = \frac{\nu}{1-\nu} p_0 \left( 1 + \frac{R_0^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma'_z = p_0$$

第 2 部分的主应力解为

$$\begin{cases} \sigma''_r = p_0 - \frac{R_0^2}{r^2} (p_0 - p_1) \\ \sigma''_\theta = p_0 + \frac{R_0^2}{r^2} (p_0 - p_1) \\ \sigma''_z = 2\nu p_0 \end{cases}$$

两部分之和为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{1}{1-\nu} p_0 \left( 1 - \frac{R_0^2}{r^2} \right) + \frac{R_0^2}{r^2} p_1 \\ \sigma_\theta = \frac{1}{1-\nu} p_0 \left( 1 + \frac{R_0^2}{r^2} \right) - \frac{R_0^2}{r^2} p_1 \\ \sigma_z = (1+2\nu) p_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $r$  为介质距巷道轴线距离;  $\nu$  为材料泊松比。

## 2.2 塑性区和破裂区应力场的计算

对于有分区破裂的围岩来讲,可分为分区破裂部分和完整部分。分区破裂部分要支撑其后完整围岩很大的压力,必须充分发挥其自承能力。分区破裂部分包括各破裂区和各塑性区。如图 3 所示,对于第  $i, i-1$  个破裂区,其内外半径分别为  $R_{i-1}^i, R_i^e, R_i^i, R_i^e$ , 外边界处的支撑反力分别为  $p_{i-1}^e, p_i^e$ 。下标表示破裂区序号,上标  $i$  表示破裂区内边界,上标  $e$  表示破裂区外边界。在环状张拉连续缝产生之前,破裂区外侧附近围岩处于塑性强化阶段,最大主应力为环向方向,最小主应力为径向方向,围岩的应力状态满足强度指标下的库仑准则,即

$$\sigma_r = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \sigma_\theta - \frac{2C \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}$$

式中,  $\varphi, C$  分别为围岩的摩擦角和内聚力。

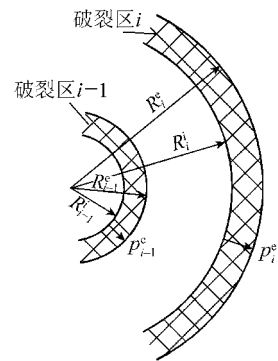


图 3 塑性应力场计算模型

Fig. 3 Calculation model of plastic stress field

再由平衡微分方程

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (2)$$

考虑内边界支护反力  $p_{i-1}^e$ , 则

$$\begin{cases} \sigma_r = (p_{i-1}^e - \sigma_i) \left( \frac{r}{R_{i-1}^e} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} + \sigma_i \\ \sigma_\theta = (p_{i-1}^e - \sigma_i) \left( \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \left( \frac{r}{R_{i-1}^e} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} + \sigma_i \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\sigma_i$  为岩石的单轴抗拉强度,  $\sigma_i = -C \cot \varphi$ , 而破裂区进入塑性软化阶段,围岩介质强度随着变形增加逐渐降低,直至降到残余抗剪强度  $\tau_s$  为止。

由本构关系  $\sigma_\theta - \sigma_r = 2\tau_s$  结合平衡微分方程(2) 得破裂区径向和切向应力为

$$\begin{cases} \sigma_r = 2\tau_s \ln \left( \frac{r}{R_i^i} \right) \\ \sigma_\theta = 2\tau_s \left[ \ln \left( \frac{r}{R_i^i} \right) + 1 \right] \end{cases} \quad (4)$$

### 2.3 破裂区内、外边界的确定

随着第  $i-1$  破裂区外侧围岩塑性区向深部发展, 支撑压力线后移, 径向拉应变逐渐增大, 考虑弹性区和塑性区径向压力连续, 弹性区内边界处各主应力由式(1)、(3)得

$$\begin{cases} \sigma_r = (p_{i-1}^e - \sigma_1) \left( \frac{r}{R_{i-1}^e} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} + \sigma_1 \\ \sigma_\theta = \frac{2}{1-\nu} p_0 - \sigma_r \\ \sigma_z = (1+2\nu)p_0 \end{cases} \quad (5)$$

当围岩塑性区拉应变达到极限拉应变时发生拉裂破坏, 围岩由塑性状态转化为脆性拉裂状态, 根据第二强度理论, 脆性拉裂破坏的强度准则为

$$\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z) = \sigma_1 \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)第1式得到第  $i$  破裂区内边界半径为

$$R_i^e = R_{i-1}^e \left[ \frac{\nu(3-2\nu)(1+\nu)p_0 + (1-\nu)\sigma_1}{(p_{i-1}^e - \sigma_1)(1-\nu)^2} \right]^{\frac{1-\sin\varphi}{2\sin\varphi}}$$

上式中的  $p_{i-1}^e$  由式(5)的第1式计算

$$p_{i-1}^e = 2\tau_s \ln \left( \frac{R_i^e}{R_i^e} \right)$$

第  $i$  破裂区内边界处环状张拉连续缝形成后, 当其外侧部分围岩的应力状态满足 Griffith 强度准则时, 围岩由弹性状态迅速转化为脆性张裂破坏状态, 由 Griffith 强度准则

$$\frac{(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2}{\sigma_\theta + \sigma_r + \sigma_z} = -24\sigma_1$$

令式(3)第1式中的  $p_1=0$ , 代入上式得第  $i$  破裂区外边界为

$$\frac{R_i^e}{R_i^e} = \left[ \frac{3}{-12(3-2\nu)(1-\nu^2)\sigma_1/p_0 - \nu^2(2\nu-1)^2} \right]^{\frac{1}{4}}$$

### 3 算 例

采用淮南丁集煤矿近千米水平大巷的围岩破裂分区作为算例。巷道等效半径  $R_1^i = 2.5$  m, 原岩应力约为  $p_0 = 34$  MPa, 围岩主要为砂质泥岩, 单轴抗拉强度  $\sigma_1 = 20$  MPa, 单轴抗压强度  $\sigma_c = 2.06$  MPa, 泊松比  $\nu = 0.276$ , 内摩擦角  $\varphi = 32^\circ$ , 分区IV位于中砂岩内, 其单轴抗拉强度  $\sigma_1 = 9.28$  MPa, 泊松比  $\nu = 0.258$ , 单轴抗压强度  $\sigma_c = 30$  MPa, 内摩擦角  $\varphi = 45^\circ$ , 破裂区I的外半径由于开挖爆破, 围岩松动的范围较大, 所以从破裂区I的外半径算起, 计算和实测结果比较见表1, 现场实测数据参见文献[18]。由表1可以看出, 采用本文提出的弹塑脆性分析方法进行分区破裂化各破裂区半径的计算, 结果与现场实测符合较好, 误

差在 2.01% 以内。

表1 理论计算与现场实测比较

Table 1 Comparison of results by calculation and in-situ monitoring

分 区	现场监测	计算结果	误差/%	
I	内径/m	2.50		
	外径/m	4.99		
II	内径/m	5.75	5.74	-0.17
	外径/m	6.55	6.68	1.98
III	内径/m	7.74	7.69	-0.65
	外径/m	8.78	8.96	2.05
IV	内径/m	9.87	9.90	0.30
	外径/m	10.40	10.19	-2.01

### 4 结 论

(1) 考虑围岩在空间轴对称受力状态下弹性、塑性、脆性状态的转化, 提出了深部围岩分区破裂化现象是围岩在特定条件下拉伸破坏与张裂破坏不断重复出现的本质。

(2) 当围岩支撑压力线处径向拉应变达到极限拉应变时, 围岩因拉伸破坏产生连续环状的张裂缝, 根据围岩弹塑性应力分析, 推导了产生拉伸破坏时的半径公式。

(3) 围岩因新产生的自由面会出现脆性张裂破坏, 根据 Griffith 强度准则, 推导了围岩由弹性状态转化脆性张裂的半径关系式, 由此可确定破裂区范围。

(4) 通过实例计算与实际观测的对比表明, 破裂带的宽度和位置都与现场实际观测到的结果吻合的较好。

### 参考文献:

- [1] 钱七虎. 非线性岩石力学的新进展——深部岩体力学的若干问题[A]. 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集[C]. 北京: 科学出版社, 2004: 10-17.  
Qian Qihu. The current development of nonlinear rock mechanics; the mechanical problems of deep rock mass[A]. Proceedings of the 8th Rock Mechanics and Engineering Conference[C]. Beijing: Science Press, 2004: 10-17.
- [2] Shemyakin I, Fisenko G L, Kurlenya M V, et al. Zonal disintegration of rocks around underground workings ( I ): data of in-situ observations[J]. Soviet Mining Science, 1986, 22(3): 157-168.
- [3] Shemyakin I, Fisenko G L, Kurlenya M V, et al. Zonal disintegration of rocks around underground workings ( II ): disintegration of rocks on models of equivalent materials[J]. Soviet Mining Science, 1986, 22(4): 223-232.
- [4] Shemyakin E I, Fisenko G L, Kurlenya M V, et al. Zonal disintegration of rocks around underground workings ( III ): theoretical notions

- [J]. Soviet Mining Science, 1987, 23(1): 1-6.
- [5] Shemyakin E I, Fisenko G L, Kurlenya M V, et al. Zonal disintegration of rocks around underground workings (IV): practical applications[J]. Soviet Mining Science, 1988, 24(3): 297-302.
- [6] Adams G D, Jager A J. Etoscopic observations of rock fracturing ahead of the stope faces in deep-level gold mines[J]. Journal of the South Africa Institute of Mining and Metallurgy, 1980(2): 115-127.
- [7] Malan D F, Spottiswoode S M. Time-dependent fracture zone behavior and seismicity surrounding deep level stopping operations[A]. Rockbursts and Seismicity in Mines[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1997: 173-177.
- [8] Sellers E J, Klerck P. Modeling of the effect of discontinuities on the extent of the fracture zone surrounding deep tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000, 15(4): 463-469.
- [9] КУРЛЕНЯ М В, ОПАРИН В Н. Проблемы нелинейной геомеханики Ч. 1 [J]. ФТПРПИ, 1999(3): 12-23.
- [10] Metlov L S, Morozov A F, Zborshchik M P. Physical foundations of mechanism of zonal rock failure in the vicinity of mine working [J]. Journal of Mining Science, 2002, 38(2): 150-155.
- [11] 钱七虎. 深部岩体工程响应的特征科学现象及“深部”的界定[J]. 华东理工学院学报, 2004, 27(1): 1-5.  
Qian Qihu. The characteristic scientific phenomena of engineering response to deep rock mass and the implication of deepness [J]. Journal of East China Institute of Technology, 2004, 27(1): 1-5.
- [12] 钱七虎. 深部地下空间开发中的关键科学问题[R]. 南京: 解放军理工大学, 2004.  
Qian Qihu. Key science problems for deep underground space excavation [R]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2004.
- [13] 李英杰, 潘一山, 章梦涛. 深部岩体分区碎裂化进程的时间效应研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(4): 119-122.
- Li Yingjie, Pan Yishan, Zhang Mengtao. Time effect on zonal disintegration process of deep rock mass [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(4): 119-122.
- [14] 李英杰, 潘一山, 李忠华. 岩体产生分区碎裂化现象机制分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1 124-1 128.  
Li Yingjie, Pan Yishan, Li Zhonghua. Analysis of mechanism of zonal disintegration of rocks [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1 124-1 128.
- [15] 潘一山, 李英杰, 唐鑫, 等. 岩石分区破裂化现象研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 3 335-3 341.  
Pan Yishan, Li Yingjie, Tang Xin, et al. Study on zonal disintegration of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 3 335-3 341.
- [16] 周小平, 钱七虎. 深埋巷道分区破裂化机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 877-885.  
Zhou Xiaoping, Qian Qihu. Zonal fracturing mechanism in deep tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 877-885.
- [17] 顾金才, 顾雷雨, 陈安敏, 等. 深部开挖洞室围岩分层断裂破坏机制模型试验与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 433-438.  
Gu Jincai, Gu Leiyu, Chen Anmin, et al. Model test study on mechanism of layered fracture within surrounding rock of tunnels in deep stratum [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 433-438.
- [18] 李术才, 王汉鹏, 钱七虎, 等. 深部巷道围岩分区破裂化现象现场监测研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1 545-1 553.  
Li Shucai, Wang Hanpeng, Qian Qihu, et al. In-situ monitoring research on zonal disintegration of surrounding rock mass in deep mine roadways [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1 545-1 553.

## 关于本刊收取稿件审理费的通知

承蒙广大作者的厚爱,近年来《煤炭学报》收稿量急剧增加,由于本刊采取严格的审稿制度,外审工作量很大,因此本刊的稿件审理费从2010年1月1日起由原来100元/篇提高到200元/篇,以补充办刊经费的不足,敬请广大作者谅解与支持。

本刊编辑部