

文章编号: 1001-1455(2009)03-0328-05

# 围岩应力重分布对隧洞爆生裂隙区 比例半径的影响<sup>\*</sup>

陈 明, 卢文波, 周创兵

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 基于爆炸应力波作用下爆生裂隙形成机理的研究, 采用莫尔库伦准则及最大拉应力准则, 研究了围岩应力重分布对爆炸应力波作用下爆生裂隙区比例半径的影响。研究表明, 围岩应力重分布对爆生裂隙区比例半径有重要影响, 隧洞围岩应力重分布将减小隧洞径向爆生裂隙区比例半径, 压剪破坏模式下, 爆生裂隙区比例半径可降低 20% 以上, 拉伸破坏模式下可降低 10% 以上。爆炸应力波作用下, 岩体更容易沿结构弱面发生压剪破坏。利用围岩的应力重分布作用, 可以降低爆破对保留岩体的损伤作用。

**关键词:** 爆炸力学; 裂隙; 爆炸应力波; 岩体; 地应力; 隧洞

**中图分类号:** O389

**国标学科代码:** 130·35

**文献标志码:** A

## 1 引 言

控制爆破可减小爆破裂隙范围, 避免对岩体造成过大的扰动, 阻止围岩基本质量指标降低, 保持围岩稳定, 对保证深埋输水隧洞、地下核废料处置库等工程的安全具有重要意义。岩体开挖中, 炸药在岩体中爆炸瞬时释放出大量的爆炸能, 并以动载荷的形式作用于周围介质, 使岩体破碎。一般认为, 岩体爆破裂纹是由爆炸应力波和爆生气体这 2 种不同类型的动荷载的作用产生的<sup>[1-2]</sup>。爆炸应力波是岩体爆破粉碎区和裂隙区形成的主要因素, 而爆生气体是岩体破碎的主要因素<sup>[3-5]</sup>。

关于爆炸应力波作用下岩体中裂隙的形成及裂隙区半径, 已有较多的研究。J. W. Dally 等<sup>[4]</sup>利用光弹性材料模型进行爆炸实验, 验证了爆炸冲击波对裂纹产生和扩展的影响。F. P. Stecher 等<sup>[5]</sup>采用数值模拟方法研究了爆炸载荷作用下脆性材料中裂纹的形成过程。王文龙<sup>[6]</sup>、张奇<sup>[7]</sup>、宗琦<sup>[8]</sup>也分别对岩石爆破裂纹的产生与扩展进行了研究。高金石等<sup>[9]</sup>研究了爆炸应力波对岩体的破碎作用, 估算出径向裂隙区半径是装药半径的 70~100 倍。H. 哈努卡耶夫<sup>[10]</sup>认为, 裂隙区半径为装药半径的 10~15 倍。多数研究者认为弹性破坏区裂纹是应力波拉伸作用的结果, 且对爆破裂隙区半径的研究是基于耦合装药条件, 结果也有一定差异, 并且有关爆炸应力波作用下爆破裂隙区半径的研究都未考虑地应力的影响。

本文中拟从爆炸应力波对岩体的动力破碎角度, 根据爆炸应力波作用下岩体爆生裂隙产生机理, 确定深埋圆形隧洞开挖中围岩应力重分布对爆生裂隙区比例半径的影响, 为确定合理的爆破开挖孔网参数, 提出控制开挖爆破对岩体的损伤措施提供依据。

## 2 爆生裂隙的产生机理

为了简化分析, 作如下假定: (1) 岩体为均质、各向同性体, 少量原生地质结构面的存在对围岩应力分布影响可以忽略不计; (2) 岩体结构面的存在对应力波衰减规律影响较小, 相邻炮孔间爆炸应力波的叠加对裂隙扩展作用较小。

深埋隧洞围岩具有一定的初始地应力, 在爆炸应力波的作用下, 岩体的受力状态被改变, 岩体在隧洞径向不仅受到初始地应力  $\sigma_r$  的作用, 还受到爆炸应力  $\sigma_{r1}$  的作用, 在环向也分别受到地应力  $\sigma_{\theta}$  和爆炸应力  $\sigma_{\theta1}$  作用, 另有地应力产生的剪切应力  $\tau_{\theta r}$  作用, 受力情况如图 1 所示。岩体受力分析过程中, 单元体同方向动荷载与静荷载产生的耦合应力为静荷载产生的应力与动荷载产生的应力之和。

\* 收稿日期: 2007-12-24; 修回日期: 2008-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(50779050, 50639100); 国家杰出青年科学基金项目(50725931)

作者简介: 陈 明(1977—), 男, 博士, 讲师。

有关爆破岩块表面特征的统计资料表明,爆破形成岩块的大多数表面是原生地质结构弱面,其数量占岩块表面总数的约 80%<sup>[9]</sup>,因此,各种地质弱面在爆破破岩作用中起着相当重要的作用。单元体在应力状态下可能出现 3 种破坏形式,即沿着结构面破坏、在岩体中发生拉伸破坏、在岩体中沿与隧洞径向成某一夹角的剪切破坏。由于结构面的强度比岩石本身强度(不含弱面)低,岩石的粘聚力远远大于结构面的粘聚力,所以岩石的破坏比结构面的破坏难。本文中重点分析岩体沿着结构面的压剪破坏、沿隧洞径向的拉伸破坏 2 种模式。

### 2.1 岩体沿结构弱面压剪破坏

设在应力波作用范围内存在一个硬性结构面,该结构面与隧洞径向成一定夹角  $\beta$ ,药包爆炸后,结构面处岩体某单元体的受力情况如图 1 所示。

根据莫尔-库伦强度准则,岩体沿结构弱面的破坏多是压剪破坏,必须满足莫尔-库伦准则,即

$$\tau_n \geq S_j = f(\sigma_n) = \sigma_n \tan \varphi_j + c_j \quad (1)$$

式中: $S_j$ 为结构弱面的剪切强度, $\sigma_n$ 为结构弱面上的法向应力; $\varphi_j$ 、 $c_j$ 分别为弱面的内摩擦角和内聚力。

在单元体径向及环向合力不变的条件下,结构弱面强度的临界值是当强度曲线与应力圆相切时取得的。此时岩体若发生剪切破坏, $\tau_n - f(\sigma_n)$ 必然取得极值,有

$$d(\tau_n - f(\sigma_n))/d\beta = 0 \quad (2)$$

根据岩体单元的具体受力情况,可以推算得到

$$(\sigma_{r1} + \sigma_{r2} - \sigma_{\theta1} - \sigma_{\theta2})(\cos(2\beta)\cos\varphi_j - \sin(2\beta)\sin\varphi_j) - 2\tau_{r\theta}(\sin(2\beta)\cos\varphi_j + \cos(2\beta)\sin\varphi_j) = 0 \quad (3)$$

按照文献[10]的结论,爆炸应力波产生的环向应力与径向应力之间有如下关系式

$$\sigma_{\theta1} = -\sigma_{r1}(1 - 2b^2) \quad (4)$$

式中: $b$ 为岩体的纵波波速和横波波速的比值,对于大多数岩石, $b \approx 0.5$ ,其中“-”表示拉应力,因此有

$$\sigma_{\theta1} = -\sigma_{r1}/2 \quad (5)$$

### 2.2 岩体在拉伸作用下的破坏

若单元体的环向合应力产生的拉应力大于岩体的动抗拉强度  $KS_t$ ,则岩体将发生拉伸破坏。考虑岩体动力荷载强度的提高,根据最大拉应力准则,则有

$$-(\sigma_{\theta1} + \sigma_{\theta2}) \geq KS_t \quad (6)$$

式中: $K$ 为动荷载作用下岩体强度的提高系数,按照相关规范,取  $K = 1.3$ 。 $S_t$ 为岩体静态抗拉强度。

## 3 爆生裂隙区比例半径

由以上的分析可知,爆生裂隙主要由岩体沿着结构面发生压剪破坏、沿炮孔径向发生拉伸破坏形成,爆生裂隙区半径的主要影响因素是地应力、爆炸荷载、岩体的抗剪强度、抗拉强度等。

当隧洞半径相对洞长很小时,按平面应变问题研究围岩应力重分布,设  $\sigma_v$  和  $\sigma_h$  分别为初始垂直和水平地应力,则圆形洞室围岩重分布应力可按式计算

$$\begin{cases} \sigma_{r2} = \frac{\sigma_h + \sigma_v}{2} \left(1 - \frac{R_0^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_h - \sigma_v}{2} \left(1 + \frac{3R_0^4}{r^4} - \frac{4R_0^2}{r^2}\right) \cos(2\theta) \\ \sigma_{\theta2} = \frac{\sigma_h + \sigma_v}{2} \left(1 + \frac{R_0^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_h - \sigma_v}{2} \left(1 + \frac{3R_0^4}{r^4}\right) \cos(2\theta) \\ \tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_h - \sigma_v}{2} \left(1 - \frac{3R_0^4}{r^4} + \frac{2R_0^2}{r^2}\right) \sin(2\theta) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $R_0$ 为开挖隧洞半径, $r$ 为单元体到隧洞中心点的距离。 $R_0 = 0$ 时,不存在围岩应力重分布的影响。

对不耦合装药,根据前苏联学者的研究<sup>[6]</sup>,爆轰气体产物膨胀撞击孔壁时压力增大,给出不耦合装药条件下孔壁的初始冲击压力

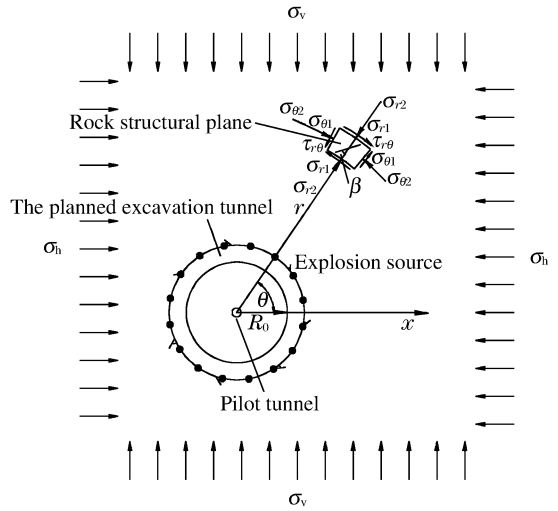


图 1 爆炸应力波作用下岩体单元受力示意图  
Fig. 1 Sketch of forces sustained on a unit rock mass under blasting stress wave

$$p_0 = \frac{\rho_0 D^2}{2(\gamma+1)} \left( \frac{r_a}{r_b} \right)^{2\gamma} n \quad (8)$$

式中:  $r_a$  为装药半径,  $r_b$  为炮孔半径,  $n$  为压力增大倍数,  $n=8\sim 10$ ,  $\gamma$  为炸药的等熵指数。

孔壁初始冲击压力形成的爆炸应力波在岩体中传播不断衰减, 爆炸应力波的衰减可根据下式计算

$$\sigma_{r1} = p_0 (\bar{r})^{-\alpha} \quad (9)$$

式中:  $\alpha$  为应力波衰减指数,  $\alpha=2-\mu/(1-\mu)$ , 其中  $\mu$  为岩体的泊松比;  $\bar{r}$  为比例半径,  $\bar{r}=r_c/r_b$ , 其中  $r_c$  为作用点到药包轴线距离, 当爆炸应力波传播一定距离后, 不再导致岩体中产生爆生裂隙, 此时  $\bar{r}$  又称为爆生裂隙区比例半径。

由式(9)可知, 爆生裂隙半径与爆炸荷载  $p_0^{(1-\mu)/(2-3\mu)}$  大约成正比关系。

将  $\sigma_{\theta 1} = -\sigma_{r1}/2$  代入式(1), 整理后得到极限平衡状态下结构面破坏的临界条件

$$\sigma_{r1} \geq \frac{2[2c_j \cos\varphi_j + 2\tau_{\theta} (-\cos(2\beta)\cos\varphi_j + \sin(2\beta)\sin\varphi_j)]}{3(\sin(2\beta)\cos\varphi_j + \cos(2\beta)\sin\varphi_j) - \sin\varphi_j} - \frac{2(\sigma_{r2} - \sigma_{\theta 2})(\sin(2\beta)\cos\varphi_j + \cos(2\beta)\sin\varphi_j) - 2\sin\varphi_j(\sigma_{r2} + \sigma_{\theta 2})}{3(\sin(2\beta)\cos\varphi_j + \cos(2\beta)\sin\varphi_j) - \sin\varphi_j} \quad (10)$$

联立式(3)、(7)、(9)、(10), 根据岩体结构面的抗剪强度、爆炸荷载及地应力条件, 可计算得到压剪破坏模式下爆生裂隙区比例半径  $\bar{r}$ 。联立式(5)~(7)、(9), 根据爆炸荷载及岩石抗拉强度, 可推算拉伸破坏下爆生裂隙区比例半径  $\bar{r}$ 。

## 4 计算实例

锦屏二级水电站有 4 条长达 16.7 km、开挖直径达 13 m 的输水隧洞, 其中 2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup> 引水隧洞全部采用爆破开挖, 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 引水隧洞西端也采用爆破开挖, 东端则采用 TBM 开挖。爆破开挖的引水隧洞断面由四心圆弧组成, 成近似圆形, 本研究中, 按圆形隧洞考虑。隧洞的爆破开挖段在初步设计中采用全断面钻爆法开挖, 全断面开挖时, 由于爆炸荷载作用时间极短, 岩体地应力在爆破开挖瞬间一般不能及时完全调整, 已开挖隧洞段对待开挖隧洞围岩应力分布影响也较小, 此时可设  $R_0=0$ , 不考虑围岩应力重分布的影响。为研究隧洞围岩应力重分布对爆生裂隙半径的影响, 设可采用中导洞法开挖, 假设导洞半径  $R_0=4.5$  m, 此时围岩应力进行重分布, 对后期隧洞轮廓开挖产生影响。

根据锦屏二级水电站引水隧洞的 PD1 长探洞所得的测试参数, 初始地应力初步选定表 1 中几组地应力参数进行计算, 表中  $\lambda$  为侧压系数。

压剪破坏模式下, 主要是硬性结构面的破坏, 本文中采用探洞中岩块岩屑型结构面的强度参数作为结构面强度的计算参数, 其内摩擦角为 24.2~26.6°, 粘聚力为 0.15~0.20 MPa, 计算中取内摩擦角为 26.6°, 粘聚力 0.20 MPa, 岩体的泊松比取 0.25。根据引水隧洞工程区岩石力学参数建议值, 岩块静抗拉强度考虑 2 种: 3.7 MPa。

隧洞开挖工程中, 通常使用 2<sup>#</sup> 岩石硝酸炸药, 因此以 2<sup>#</sup> 岩石硝酸炸药参数计算爆炸的初始冲击压力, 取  $\rho_0=1$  g/m<sup>3</sup>,  $D=3.6$  km/s,  $n=8$ , 根据公式(8)计算轮廓爆破采用 42 mm 炮孔直径、25 mm 药卷直径的不耦合装药爆破对围岩的影响, 此时的爆炸荷载  $p_0=576$  MPa。

隧洞开挖崩落孔一般距离周边孔 40~60 倍孔半径, 崩落孔爆破产生的裂隙在围岩中的深度一般不会超出周边孔光面爆破产生的深度, 而实践工程中特别关注的是爆破对隧洞保留围岩的影响深度, 因此计算中只分析周边孔光面爆破隧洞径向开挖轮廓面内岩体的爆生裂隙区比例半径。根据以上参数, 可以计算得到压剪破坏下不同地应力时径向爆生裂隙区比例半径沿洞周的分布, 如图 2 所示。拉伸破坏时不同地应力下隧洞径向爆生裂隙区比例半径的典型分布如图 3 所示。

由图 2 可知, 压剪破坏模式下, 围岩应力重分布将减小隧洞径向爆生裂隙比例半径。图 2(a)中, 采用  $R_0=5$  m 的导洞开挖较采用全断面开挖的爆生裂隙区比例半径降低约 30%~45%。图 2(b)中降低约 30%~60%, 图 2(c)中降低约 35%~42%, 图 2(d)中降低约 30%~60%。当  $\lambda>1$  时, 隧洞顶部和底部的爆生裂隙区比例半径小于洞腰的; 当  $\lambda<1$  时, 隧洞顶部和底部的爆生裂隙区比例半径大于洞腰的。当采用  $R_0=4$  m 的中导洞开挖时, 爆生裂隙区比例半径也较全断面降低 20%以上。

由图 3 可知, 拉伸破坏模式下, 由于考虑地应力重分布, 隧洞环向较大的压应力阻碍了爆生裂隙的扩展, 爆生裂隙区比例半径都较小, 几种地应力参数下, 爆生裂隙区比例半径均未超过 5, 拉伸破坏模式下, 围岩应力重分布可降低爆生裂隙区比例半径约 10%~20%。

表 1 地应力参数

Table 1 Parameters for in-situ stress

$\sigma_h$ /MPa	$\sigma_v$ /MPa	$\lambda$
25.80	18.40	1.40
42.40	19.40	2.19
20.08	24.24	0.83
20.94	41.08	0.51

比较图 2、3 可知,较高的地应力条件下,爆生裂隙的比例半径一般较小。压剪破坏模式的爆生裂隙区比例半径较拉伸破坏模式的大。而且,在隧洞开挖过程中采用中导洞法,可以利用围岩的应力重分布作用,减小隧洞洞周岩体径向爆生裂隙区比例半径,降低爆破对保留岩体的损伤作用。

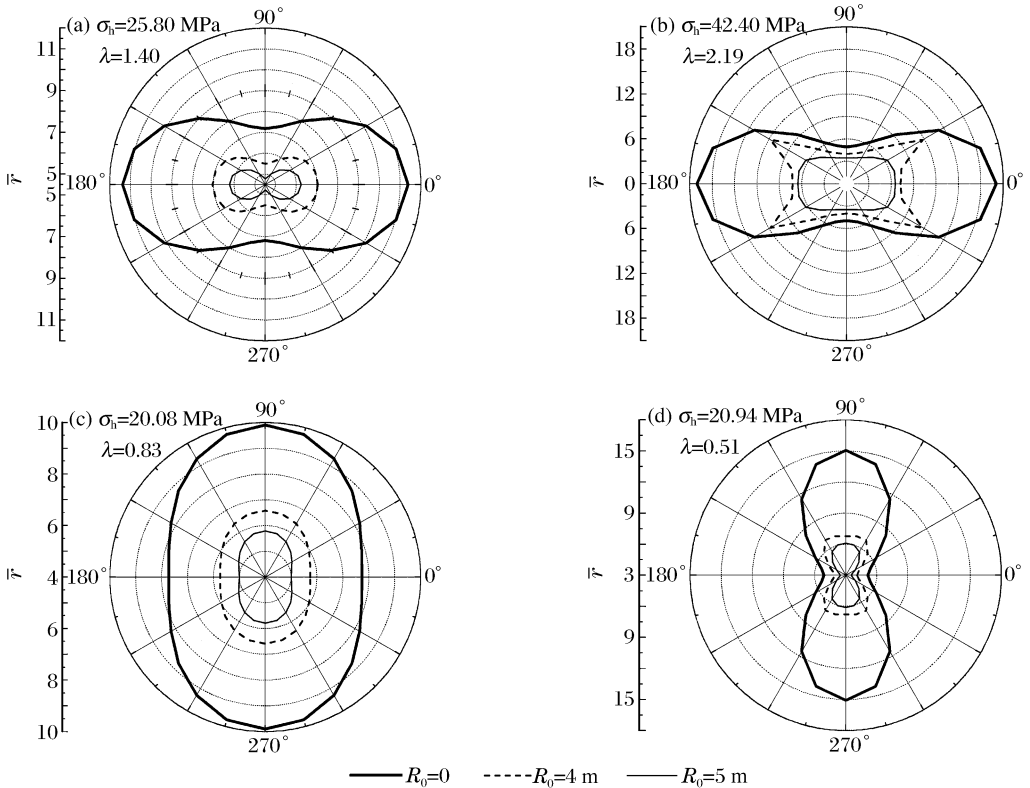


图 2 压剪破坏时不同地应力下爆生裂隙区比例半径分布  
Fig. 2 Proportional radius of blasting-induced cracking zones in compression and shear failure under different in-situ stresses

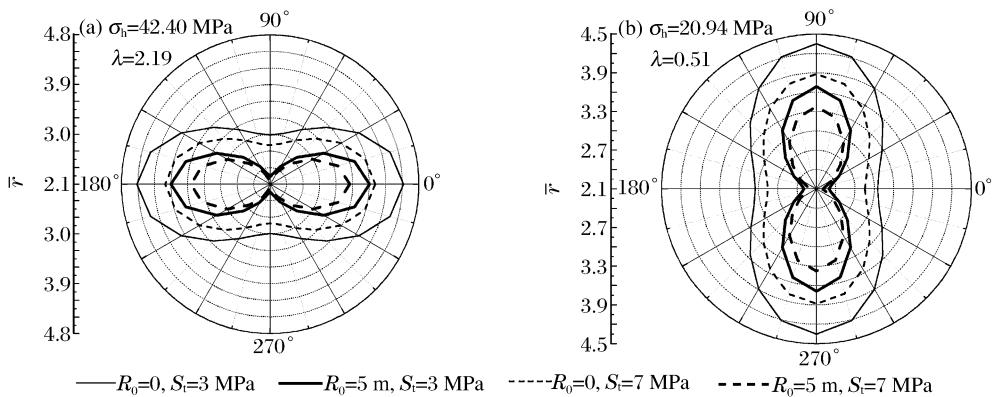


图 3 拉伸破坏时不同地应力下爆生裂隙区比例半径分布

Fig. 3 Proportional radius of blasting-induced cracking zones in tension failure under different in-situ stresses

## 5 结 论

通过上述理论分析与计算,可以得以下主要结论:(1)爆炸应力波作用下,隧洞围岩应力重分布将减小隧洞径向爆生裂隙区比例半径,压剪破坏模式下,爆生裂隙区比例半径可减小 20% 以上,拉伸破坏模式下可降低 10% 以上。(2)在有较高地应力的岩体中,爆生裂隙的比例半径一般较小,岩体在拉伸破坏模式下的爆生裂隙区比例半径比压剪破坏模式下的小,爆炸应力波作用下,岩体更容易沿结构弱面发生压剪破坏。(3)隧洞开挖过程中,利用围岩的应力重分布作用,可以减少隧洞洞周岩体径向爆生裂隙区比例半径,降低爆破对保留岩体的损伤作用。

## 参考文献:

- [1] Bhandari S. On the role of stress waves and quasi-static gas pressure in rock fragmentation by blasting[J]. *Acta Astronautica*, 1977,6(3-4):365-383.
- [2] Plaine A S, Please C P. An improved model of fracture propagation by gas during rock blasting—some analytical results[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1994,31(6):699-706.
- [3] Donze F V, Bouchez J, Magnier S A. Modeling fractures in rock blasting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997,34(8):1153-1163.
- [4] Dally J W, Fournay W L, Holloway D C. Influence of containment of the bore hole pressures on explosive induced fracture[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1975,12(1):5-12.
- [5] Stetcher F P, Fournay W L. Prediction of crack motion from detonation in brittle materials[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1981,18(1):23-33.
- [6] 王文龙. 钻眼爆破[M]. 北京:煤炭工业出版社,1984
- [7] 张奇. 岩石爆破的粉碎区及其空腔膨胀[J]. *爆炸与冲击*, 1990,10(1):68-75.  
ZHANG Qi. Smash districts and expanding of cavities in rock blasting[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1990,10(1):68-75.
- [8] 宗琦. 岩石内爆炸应力波破裂区半径的计算[J]. *爆破*, 1994,11(2):15-17.  
ZONG Qi. Calculation of cracked zone radius in rock by blasting stress wave[J]. *Blasting*, 1993,11(2):15-17.
- [9] 高金石,张继春. 爆破破岩机理动力分析[J]. *金属矿山*, 1989(9):6-12.  
GAO Jin-shi, ZHANG Ji-chun. Dynamic analysis of fracturing mechanism of rock under explosion[J]. *Metal Mine*, 1989(9):6-12.
- [10] 哈努卡耶夫 H. 矿岩爆破物理过程[M]. 刘殿中,译. 北京:冶金工业出版社,1980.

## Influence of in-situ stress redistribution on proportional radii of blasting-induced cracking zones in tunnel excavation

CHEN Ming<sup>\*</sup>, LU Wen-bo, ZHOU Chuang-bing

*(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)*

**Abstract:** Based on the study on the forming mechanism of blasting-induced crack under blasting stress wave, by adopting the Mohr-Coulomb criterion and the maximum stress criterion, the influence of in-situ stress redistribution on the proportional radius of the blasting-induced cracking zone (PRBICZ) in deep-buried tunnel excavation was explored. Results indicate that the in-situ stress redistribution has great influence on the PRBICZ, and that the in-situ stress redistribution in the rock mass can decrease the radial PRBICZ. Under compression and shear failure, the PRBICZ can be decreased more than 20%; under tension failure, the PRBICZ can be decreased more than 10%. Compression and shear failure of the rock mass is more likely to occur along the soft structure plane under blasting stress wave. The in-situ stress redistribution can reduce the blasting-induced cracking zone.

**Key words:** mechanics of explosion; crack; blasting stress wave; rock mass; in-situ stress; tunnel

<sup>\*</sup> Corresponding author: CHEN Ming  
Telephone: 86-27-68772221

E-mail address: whuchm@yahoo.com.cn