

DOI: 10.11779/CJGE201502022

基于硬脆性岩体剥落性状的初始地应力场评估

刘立鹏¹, 汪小刚¹, 李拙民², 刘海舰², 林兴超¹

(1. 中国水利水电科学研究院岩土工程研究所, 北京 100048; 2. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 处于高地应力环境的硬岩工程, 由于开挖扰动导致围岩应力环境变化, 进而发生脆性剥落破坏。线性工程沿洞线地应力场分布受到各种因素的影响, 判别沿线地应力分布规律对于施工安全和衬砌支护设计具有重要意义。在介绍初始地应力分布统计规律的基础上, 对地下洞室轴线与初始地应力场排布不同组合情况下, 围岩二次应力场及偏应力分布规律进行了模拟研究。基于硬脆性岩石破坏准则, 推导了考虑硬脆性围岩破坏宏观表征的洞轴平面初始应力场求解公式, 对所推导的公式进行了工程验证, 结果比较吻合。研究结果可为深埋硬岩隧道工程初始地应力场量值判别及工程支护设计提供一定的借鉴和参考。

关键词: 隧道工程; 硬岩; 脆性破坏; 地应力评估

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)02-0363-06

作者简介: 刘立鹏(1983-), 男, 安徽人, 博士, 工程师, 主要从事地下洞室及结构工程稳定性方面的研究工作。E-mail: liulip@iwahr.com。

Evaluation of in-situ stress based on spalling behavior of hard rock mass

LIU Li-peng¹, WANG Xiao-gang¹, LI Zhuo-min², LIU Hai-jian², LIN Xing-chao¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Due to change of stress in rock mass during excavation, brittle failure will happen in hard rock engineering with high in-situ stress, such as spalling, rock burst, etc., and the in-situ stress along tunnel axis with linear underground engineering is influenced by various factors. It is important to determine the distribution of in-situ stress for safe construction and lining support design. Based on the introduction of statistical distribution of in-situ stress, stress redistribution and deviatoric stress law of the surrounding rock are simulated under different combinations of tunnels and directions of the principal stress. Based on the failure criterion for brittle rock, a formula for solving the in-situ stress of plane perpendicular to tunnel axis is deduced considering the characteristics of failure of hard rock brittle. The formula is verified by practical engineering with high coherency. The results provide references for the determination of in-situ stress of underground engineering and the design of engineering support.

Key words: tunneling engineering; hard rock; brittle failure; evaluation of in-situ stress

0 引言

深埋于地下的硬脆性岩体, 在工程开挖扰动下, 自初始相对稳定的非稳定应力场向二次应力场转化过程中, 由于局部应力集中及主应力方向旋转, 极易发生脆性破坏, 宏观表现为片帮、连续性剥落、岩爆等^[1-2]。水利水电、交通等工程隧洞洞线一般较长, 如锦屏二级水电站引水隧洞、乌鞘岭铁路隧道、秦岭终南山公路隧道等, 穿越不同山体或局部构造带, 如向斜、背斜、断层等。Brown 等对初始应力场分布特征进行了统计分析^[3], Fuchs 等在搜集世界各国地应力测试数据基础上绘制了世界地应力分布图^[4]。地应力作为深埋岩石工程中不可忽略的稳定因素, 受到各种因素的影

响。地质构造单元的存在及地形地貌等, 均对沿洞段地应力分布特征产生程度不同的影响^[5-6]。局部地段的地应力测量, 虽有助于宏观上把握初始地应力场分布特征, 但测试经费高昂, 占用时间较长, 无法实现沿洞段的密集测量, 而深埋地下洞室硬脆性破坏宏观表象与地应力场分布特征相关^[7], 初衬、二衬参数之间亦具有很高的关联性, 故而利用洞室建设中围岩所表现的脆性破坏表征, 反演分析局部地应力场分布特征,

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB035401); 国家自然科学基金项目(51179210); 中国水利水电科学研究院科研专项(岩基本科研1411)

收稿日期: 2014-05-20

无论对于施工安全或衬砌优化设计,均具有较大的作用。硬脆性围岩脆性破坏机理及破坏准则,许多学者开展了研究^[7-11],并提出了行之有效的预测方法,但对于根据硬脆性破坏表征现象进行地应力场特征进行判别的研究较少^[12],仅在石油行业和地球物理勘探中有孔壁塌落法预测地应力的研究和应用^[13-14],且公式推导过程中主要是利用岩石强度准则,该准则在预测岩体破坏范围方面具有一定的局限性^[7]。

鉴于此,本文在介绍初始地应力场分布规律研究成果的基础上,对不同初始地应力场主应力方向与洞室轴线排布组合情况下,围岩二次应力场分布特征进行了模拟研究。同时,根据 Martin 等所提出的较为适宜的硬脆性围岩破坏准则^[7],推导了基于围岩破坏深度、范围等宏观表征的洞轴平面初始地应力计算公式,并对研究结果进行了工程实例验证,研究成果可为深埋硬岩隧道工程初始地应力场量值判别及工程支护设计提供借鉴。

1 初始地应力分布

Brown 等^[3]收集分析了世界不同地区地应力的测量结果,总结出竖直应力随深度变化的拟合公式为

$$\sigma_v = 0.027H \quad (1)$$

式中, σ_v 为竖直应力(MPa), H 为上覆岩体深度(m)。

水平平均主应力与竖直应力之比随埋深的分布规律关系为

$$\frac{100}{H} + 0.3 \leq \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2\sigma_v} \leq \frac{1500}{H} + 0.5 \quad (2)$$

式中, σ_H 为最大水平主应力(MPa), σ_h 为最小水平主应力(MPa)。

景锋等^[15]对中国大陆浅层实测地应力进行回归分析后,得到垂直应力 σ_v 随深度 H 变化的规律为

$$\sigma_v = 0.0271H \quad (3)$$

同时得到中国水平主应力比值与埋深间关系为

$$1.1 < \frac{\sigma_H}{\sigma_h} < \frac{1550}{H} + 1.05 \quad (4)$$

以上研究结果只是地应力测量资料的统计分析,并未考虑地层、地形地貌、地质单元等对于地应力的影响。赵德安等^[16]、朱焕春等^[17]研究表明不同岩性岩体中地应力量值分布规律不同,水平应力比、侧压力系数等亦有明显变化。谭成轩等研究表明地形地貌对于地应力分布具有一定的影响范围^[5],断层、褶皱等地质构造同时影响着局部地应力场分布^[6]。工程区域内的初始地应力场宏观特征,利用现场测试技术,结合统计分析结果等手段可宏观把握,然而线性地下工程,地应力量值及方向随洞室所赋存环境,沿洞线将发生较大的变化。

2 围岩二次应力场

无论是水利水电、公路、铁路等工程,工程区域地形变化一般较大,沿线亦分布各种地质构造体,影响局部地应力场。地下洞室轴向并不平行于初始地应力场中某个主应力方向,此处利用数值软件,模拟分析初始应力场主应力方向与洞轴不同排布向时,洞壁围岩应力分布特征。

排布方式分为洞轴与某主应力方向平行及具有一定角度相交情况,具体洞室轴线与初始地应力场空间位置如图 1 所示。

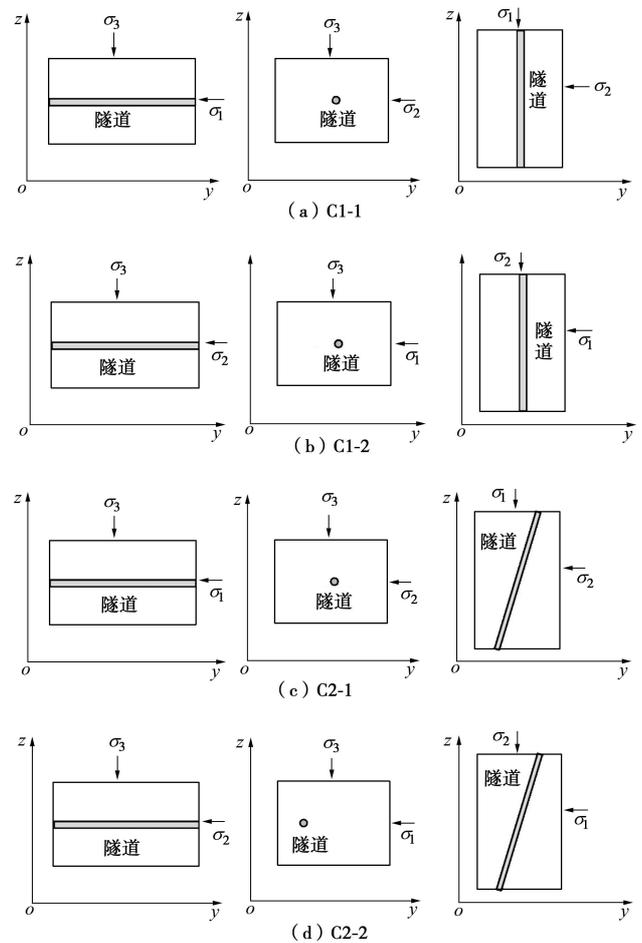


图 1 洞室空间位置及与初始应力场关系

Fig. 1 Relationship between location of tunnel and in-situ stress

C1-1、C1-2 模型中洞轴与初始应力场中某主应力平行, C2-1、C2-2 模型中,洞轴与初始主应力具有一定的相交角度。岩体弹性模量 $E=30$ GPa,泊松比 $\nu=0.25$,初始地应力场中 $\sigma_1=35$ MPa, $\sigma_2=25$ MPa, $\sigma_3=15$ MPa,掌子面附近二次应力场中最大主应力如下图所示 2 所示,其中中心底板为 0° 。

由图 2 可知,当最大主应力垂直于洞室轴向时,围岩二次应力场中最大主应力量值明显高于其他初始应力与洞轴组合形式,即地下洞室围岩中最大主应力

分布以与洞轴垂直或大角度相交的初始应力场中主应力量值控制为主。此外，最大主应力量值分布较为对称，即不考虑岩体不节理及微观缺陷存在的情况下，围岩所发生破坏的位置与形状基本对称。对应于 C2 组合，由于洞室轴线与初始地应力中最大主应力具有一定的相交角度，围岩中的最大主应力量值分布特征与 C1 情况略有不同，90° 及 -90° 位置为自对称形式转变为非轴对称形式，如果围岩的破坏以最大主应力为主控因素，则不考虑岩体微裂隙分布等情况，势必造成围岩破坏特征存在局部的不同。

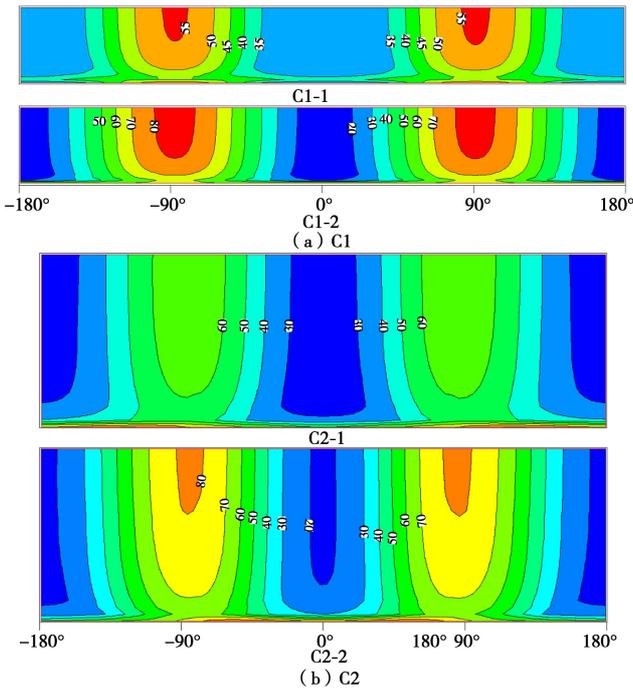


图 2 最大主应力分布

Fig. 2 Distribution of maximum principal stress

不同组合形式下偏应力分布形式如图 3 所示。

由图 3 可知，在不同初始应力场时，围岩中偏差应力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 在量值分布上基本对称，即初始地应力场中，洞室轴线与初始应力场中最大主应力成一定角度相交时，对于围岩中偏差应力的分布形式的影响较小，如围岩破坏以偏差应力作为主控因素，则此时的破坏特征以对称形式为主。

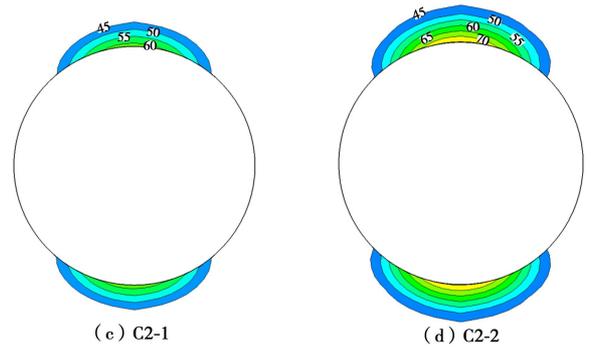
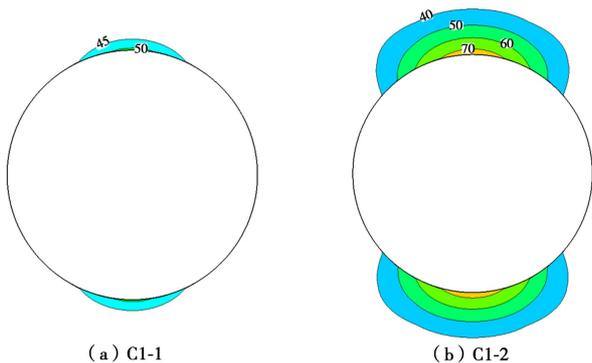


图 3 偏应力分布形式

Fig. 3 Distribution of deviatoric stress

3 基于硬脆性岩体剥落性状的初始地应力场判断

3.1 公式推导

假设线性地下洞室轴线与初始应力场中某主应力方向平行，开挖岩体的垂直应力为 P_V ，水平应力为 P_H 且均匀分布，侧压系数 $K=P_H/P_V$ ，如图 4 所示，则洞壁围岩径向应力 σ_r 、切向应力 σ_θ 及剪应力 $\tau_{r\theta}$ 分别采用下式计算：

$$\sigma_r = \frac{1}{2} P_V \left[(1+K) \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) + (K-1) \left(1 - \frac{4r_0^2}{r^2} + \frac{3r_0^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right], \tag{5}$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} P_V \left[(1+K) \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) - (K-1) \left(1 + \frac{3r_0^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right], \tag{6}$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2} P_V (1-K) \left(1 + \frac{2r_0^2}{r^2} - \frac{3r_0^4}{r^4} \right) \sin 2\theta, \tag{7}$$

式中， r_0 为洞室半径， r 为径向距离， θ 为自水平轴算起的极坐标中的角度。

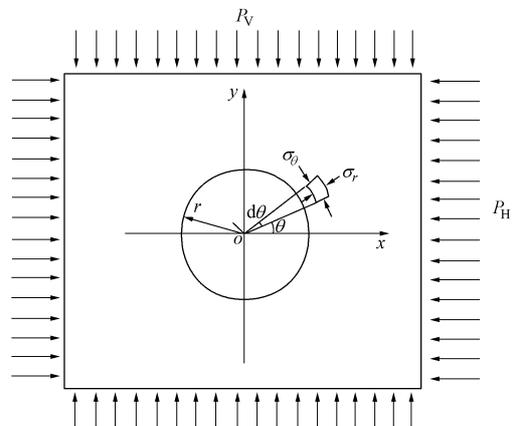


图 4 围岩应力计算简图

Fig. 4 Diagram of stress of rock mass

则围岩中任意一点 (r, θ) 处的最大主应力 σ_1 和

最小主应力 σ_3 分别为

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta) + \left[\frac{1}{4}(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + \tau_{r\theta}^2 \right]^{1/2}, \quad (8)$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta) - \left[\frac{1}{4}(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + \tau_{r\theta}^2 \right]^{1/2}. \quad (9)$$

由上式知, 当 $r=r_0, \theta=0^\circ$ 时, 洞壁围岩最大主应力 $\sigma_1 = 3P_v - P_h, \sigma_3 = 0$; $r=r_0, \theta=90^\circ$ 时, 最小主应力 $\sigma_1 = 3P_v - P_h, \sigma_3 = 0$ 。

则对于洞室围岩中任意一点偏应力值为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{r\theta}^2}. \quad (10)$$

Martin 等^[7]研究表明, 地下岩体硬脆性破坏与初始地应力场相关, 平面应力状态下破坏范围与偏差应力量值的大小相关,

$$\sigma_1 - \sigma_3 = A\sigma_c, \quad (11)$$

式中, σ_1 为弹性状态下二次应力场中最大主应力, σ_3 为弹性状态下二次应力场中最小主应力, σ_c 为岩石单轴抗压强度, A 为相关系数, 一般取 1/3。

将式 (10) 代入式 (11), 可得

$$\sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{r\theta}^2} = A\sigma_c. \quad (12)$$

深埋地下硬岩工程围岩脆性破坏特征一般如下图 5 所示, 利用 V 字型破坏最大深度点连线可确定最大主应力方向, 并相应确定最小主应力方向^[8]。

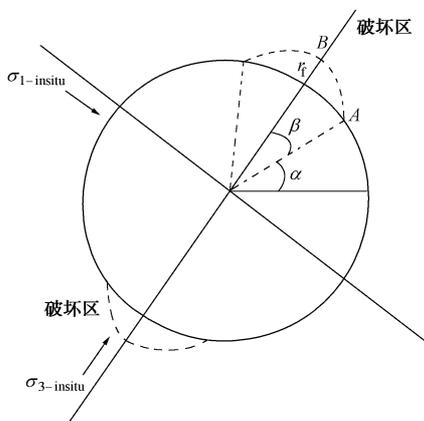


图 5 围岩硬脆性破坏特征

Fig. 5 Characteristics of brittle failure of hard rock

同时可利用 A, B 两点破坏公式确定具体初始主应力量值, 进而总体确定垂直洞轴平面最大主应力大

表 1 基于硬脆性围岩破坏特征的地应力推算结果

Table 1 Calculated results of in-situ stress based on failure characteristics of surrounding hard rock mass

| 岩性 | r_f/r_0 | σ_1 /MPa | σ_3 /MPa | σ_c /MPa | $\beta(^{\circ})$ | 计算值 | | 差值 | |
|-----------------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|
| | | | | | | $\sigma_{1-insitu}$ /MPa | $\sigma_{3-insitu}$ /MPa | $\delta\sigma_1/\%$ | $\delta\sigma_3/\%$ |
| 厚层花岗岩 ^[18] | 0.4 | 59 | 11 | 220 | 44 | 59.71 | 10.16 | 1.20 | 7.64 |
| 块状安山岩 ^[18] | 0.5 | 31.3 | 15.4 | 100 | 59 | 32.68 | 16.16 | 4.41 | 4.94 |
| 厚层石英岩 ^[19] | 0.45 | 111.6 | 60 | 350 | 62 | 109.79 | 61.21 | 1.62 | 2.02 |
| 层状石英岩 ^[20] | 0.35 | 52.5 | 15.5 | 250 | 44 | 64.46 | 15.46 | 22.78 | 0.26 |
| 层状石灰岩 ^[21] | 0.1 | 15.7 | 12.1 | 80 | 49 | 15.15 | 12.31 | 3.50 | 1.74 |
| 层状石英岩 ^[22] | 0.08 | 33.8 | 20 | 151 | 40 | 27.13 | 21.11 | 19.73 | 5.55 |

小及方向。

其中, 对于图 5 中 A 点:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{2}P_v \left[(1+K) \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) + (1-K) \left(1 + \frac{3r_0^4}{r^4} \right) \cos 2\beta \right] \\ &= \frac{1}{2}P_v [2(1+K) + 4(1-K)\cos 2\beta] \\ &= P_v [(1+K) + 2(1-K)\cos 2\beta] \\ &= A\sigma_c. \end{aligned} \quad (13)$$

对于 B 点, 令 $B=r_0/(r_f+r_0)$, 则

$$\begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_3 &= \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{r\theta}^2} \\ &= \left| \frac{1}{2}P_v [(1+K)(1-B^2) + (K-1)(1-4B^2+3B^4)] - \frac{1}{2}P_v [(1+K)(1+B^2) + (1-K)(1+3B^4)] \right| \\ &= \left| P_v [-B^2(1+K) + (K-1)(1-2B^2+3B^4)] \right| \\ &= A\sigma_c. \end{aligned} \quad (14)$$

联立式 (13)、(14) 解得

$$K_1 = \frac{2\cos 2\beta + B^2 - 3B^4}{2\cos 2\beta - 2 + 3B^2 - 3B^4}, \quad (15)$$

$$K_2 = \frac{2 + 2\cos 2\beta - B^2 + 3B^4}{2\cos 2\beta - 3B^2 + 3B^4}. \quad (16)$$

由于式 (16) 中 K_2 计算结果均小于 0 与实际地应力侧压系数值不符合, 故而舍弃。进而得到垂直洞轴平面内初始地应力场量值:

$$\sigma_{1-insitu} = \frac{A\sigma_c}{1+K+2(1-K)\cos 2\beta}, \quad (17)$$

$$\sigma_{3-insitu} = \frac{KA\sigma_c}{1+K+2(1-K)\cos 2\beta}, \quad (18)$$

式中, $\sigma_{1-insitu}$ 为初始应力场中最大主应力, $\sigma_{3-insitu}$ 为初始应力场中最小主应力,

对于其他复杂洞型地下洞室围岩应力重分布量值的求解, 可采用复变函数或数值软件实现。

3.2 计算实例

采用式 (17)、(18), 结合已有文献中地下洞室硬脆性围岩破坏特征描述, 对初始地应力场量值反演结果如表 1 所示。

由表1可知, 根据岩石单轴抗压强度、围岩破坏深度及范围, 可初步判别地应力场量值大小。分析结果与现场实测值较为吻合, 即采用这一方法, 可高效地初步判断地下洞室局部洞段垂直洞轴面地应力场量值, 进而可为现场工作人员安全、衬砌设计等提供一定的判断。

4 结 语

深埋长隧洞地下工程由于所穿越地质构造单元较多, 局部地应力场会发生根本性变化, 如何判别这一变化对于施工安全及设计均具有一定的实际意义。在对初始应力场主应力方向与洞轴组合变化围岩应力分布情况模拟分析的基础上, 结合硬脆性围岩破坏准则, 推导了洞轴平面初始地应力计算公式, 可结合围岩硬脆性破坏深度和范围情况, 进行初始应力场判别。工程验证表明, 计算结果与实测结果吻合较好, 在实际工程中具有一定的适用性, 有助于现场初步判别地应力场量值及方向。

参考文献:

- [1] EBERHARDT E. Numerical modelling of three-dimension stress rotation ahead of an advancing tunnel face[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, **38**(4): 499 - 518.
- [2] 刘立鹏, 汪小刚, 贾志欣, 等. 掌子面推进过程围岩应力及裂隙发育规律[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, **44**(2): 764 - 771. (LIU Li-peng, WANG Xiao-gang, JIA Zhi-xin, et al. Tunnel face advancing on development of stress and microfracture around excavation[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2013, **44**(2): 764 - 771. (in Chinese))
- [3] BROWN E T, HOEK E. Trends in relationships between measured in-situ stress and depth[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1978, **15**(4): 211 - 215.
- [4] FUCHS K, MÜLLER B. World stress map of the earth: a key to tectonic processes and technological applications[J]. *Naturwissenschaften*, 2001, **88**(9): 357 - 371.
- [5] TAN C, WANG R, SUN Y, et al. Numerical modelling estimation of the 'tectonic stress plane' (TSP) beneath topography with quasi-U-shaped valleys[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, **41**(2): 303 - 310.
- [6] SU S, STEPHANSSON O. Effect of a fault on in situ stresses studied by the distinct element method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, **36**(8): 1051 - 1056.
- [7] MARTIN C D, KAISER P K, MCCREATH D R. Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, **36**(1): 136 - 151.
- [8] EDELBRO C. Numerical modelling of observed fallouts in hard rock masses using an instantaneous cohesion-softening friction-hardening model[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, **24**(4): 398 - 409.
- [9] READ R S, CHANDLER N A, DZIK E J. In situ strength criteria for tunnel design in highly-stressed rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1998, **35**(3): 261 - 278.
- [10] HAJIABDOLMAJID V, KAISER P. Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2003, **18**(1): 35 - 48.
- [11] 黄书岭, 冯夏庭, 张传庆. 脆性岩石广义多轴应变能强度准则及试验验证[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, **27**(1): 124 - 134. (HUANG Shu-ling, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing. A new generalized polyaxial strain energy strength criterion of brittle rock and polyaxial test validation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(1): 124 - 134. (in Chinese))
- [12] 陆家佑, 王昌明. 根据岩爆反分析岩体应力研究[J]. *长江科学院院报*, 1994, **11**(3): 27 - 30. (LU Jia-you, WANG Chang-ming. Study on back analysis for stress of rock mass from information of rockbursts[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1994, **11**(3): 27 - 30. (in Chinese))
- [13] 翟玉树. 对孔壁崩落预测地应力方法的评价[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2012, **30**(6): 662 - 667. (ZHAI Yu-shu. Evaluation on method of predicting in-situ stresses by using borehole breakout[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2012, **30**(6): 662 - 667. (in Chinese))
- [14] HAIMSON B. Micromechanisms of borehole instability leading to breakouts in rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, **44**(2): 157 - 173.
- [15] 景 锋, 盛 谦, 张勇慧, 等. 中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, **26**(10): 2056 - 2062. (JING Feng, SHENG Qian, ZHANG Yong-hui, et al. Research on distribution rule of shallow crustal

- geostress in China mainland[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(10): 2056 - 2062. (in Chinese))
- [16] 赵德安, 陈志敏, 蔡小林, 等. 中国地应力场分布规律统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(6): 1265 - 1271. (ZHAO De-an, CHEN Zhi-min, CAI Xiao-lin, et al. Analysis of distribution rule of geostress in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(6): 1265 - 1271. (in Chinese))
- [17] 朱焕春, 陶振宇. 不同岩石中地应力分布[J]. 地震学报, 1999, **16**(1): 49 - 63. (ZHU Huan-chun, TAO Zhen-yu. Geostress distributions in different rocks[J]. Acta Seismologica Sinica, 1999, **16**(1): 49 - 63. (in Chinese))
- [18] MARTIN C D, MARTINO J B and DZIK E J. Comparison of borehole breakouts from laboratory and field tests[C]// Proceedings of EUROCK'94, SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering. Rotterdam: A A Balkema, 1994: 183 - 190.
- [19] ORTLEPP W D, GAY N C. Performance of an experimental tunnel subjected to stresses ranging from 50 MPa to 230 MPa[C]// Proceedings of the ISRM Symposium: Design and Performance of Underground Excavations. London: British Geotechnical Society, 1984: 337 - 346.
- [20] STACEY T R, DE JONGH C L. Stress fracturing around a deep-level bored tunnel[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1977, **78**(5): 124 - 133.
- [21] JIAYOU L, LIHUI D, CHENGJIE Z, et al. The brittle failure of rock around underground openings[C]// Proceedings of the Conference on Rock Mechanics and Rock Physics at Great Depth. Rotterdam: A A Balkema, 1989: 567 - 574.
- [22] KIRSTEN H A D, KLOKOW J W. Control of fracturing in mine rock passes[C]// Proceedings of the 4th, ISRM Congress on Rock Mechanics. Rotterdam: A A Balkema, 1979: 203 - 210.

本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司
 封 3 北京理正软件股份有限公司
 封 4 上海分元土木工程科技有限公司
 后插 1 庆祝南京水利科学研究院成立 80 周年
 后插 2 台州建元勘察仪器有限公司