

# 深埋巷道地应力测量及围岩应力分布特征研究

罗超文, 李海波, 刘亚群

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 基于淮南矿务局潘一矿的水压致裂法地应力测量结果及围岩应力分布特征研究, 可以得出如下初步结论: (1) -790 m 高程东翼矸石胶带机大巷区地应力以构造应力场为主, 其最大原岩水平主应力值大于 28.33 MPa, 岩石单轴饱和抗压强度与最大水平主应力比值为 5.82, 属高应力区; (2) 在高地应力作用下巷道围岩塑性区从洞周向深部逐渐扩展, 同时围岩应力也在塑性区向纵深方向逐渐增大, 受围岩弱化的影响, 围岩应力在约 2 倍洞径处应力达到最大值, 然后再降低并趋于原岩应力; (3) 底板轨道大巷对顶板围岩应力分布的影响范围大于 6 倍洞径, 远远超过根据传统弹性力学计算的 3 倍洞径影响范围。研究表明, 深埋巷道围岩应力分布特征有别于传统的浅埋巷道, 可为类似巷道围岩的变形破坏机制分析以及巷道加固支护提供参考。

**关键词:** 采矿工程; 深埋巷道; 水压致裂法; 地应力测量; 围岩应力; 分布特征

**中图分类号:** TD 163

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)07 - 1418 - 06

## STUDY OF DISTRIBUTING CHARACTERISTICS OF STRESS IN SURROUNDING ROCK MASSES AND IN-SITU STRESS MEASUREMENT FOR DEEPLY BURIED TUNNELS

LUO Chaowen, LI Haibo, LIU Yaqun

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** The following preliminary results are obtained based on the study of in-situ stress measurements using hydraulic fracturing(HF) method and distributing characteristics of stress in surrounding rock masses in the region of Panyi Mine: (1) The dominative stress of the tunnel for Gangue adhesive tape machine at elevation -790 m is tectonic stress and the maximum horizontal principal stress is larger than 28.33 MPa. The ratio of saturated uniaxial compressive stress to maximum horizontal principal stress is 5.82, which means that the stress level in this region belongs to high stress are. (2) The plastic zone of surrounding rock to the ratio of maximum horizontal principal stress for the tunnel extends from the periphery to depth; at the same time, the stress of surrounding rock gradually increases and reaches the maximum value at a location of about 2 times of tunnel diameter, then gradually decreases and is finally equal to in-situ stress in some location. (3) The influence range of the floor track tunnel on the stress of surrounding rock of the top tunnel is greater than 6 times of tunnel diameter, which far exceeds the influence range of 3 times of that obtained by traditional elastic mechanics. The above results indicate that the distributing characteristics of stress in surrounding rock masses for deep-buried tunnels are different from that for shallow-buried tunnels, and it can provide references for similar projects.

**Key words:** mining engineering; deep-buried tunnels; hydraulic fracturing method; in-situ stress measurements; stress of surrounding rocks; distributing characteristics

**收稿日期:** 2010 - 01 - 20; **修回日期:** 2010 - 04 - 21

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732001)

**作者简介:** 罗超文(1963 - ), 男, 1999 年于武汉工业大学获岩土工程专业博士学位, 现任副研究员, 主要从事地应力、岩石力学实验以及相应实验仪器开发与研制方面的研究工作。E-mail: cwluo@whrsm.ac.cn

## 1 引言

随着我国经济的快速发展,对各种资源需求日益提高。煤炭作为主要能源是国家能源安全和经济安全的基础,在中国能源发展战略格局中具有不可替代的地位。由于煤炭需求不断增加,目前煤矿开采大部分已由露采转为地采,且采深越来越大,矿井巷道的建设和维护也越来越困难<sup>[1, 2]</sup>。

地应力是造成矿山巷道及其他地下工程变形和破坏的根本作用力,地应力的大小和方向直接影响到巷道围岩的稳定性。对巷道原岩地应力进行测量,研究围岩的应力分布特征是进行巷道围岩稳定性分析以及实现地下工程开挖设计科学化的必要前提。随着开采深度的加大,矿山巷道围岩变形控制是煤炭生产建设重大技术问题之一,由于巷道围岩的变形问题,造成矿井巷道的维护困难。大埋深的矿井巷道的维护、冲击地压等灾害现象都与地应力有密切的关系<sup>[1]</sup>。但受深部岩体的地应力状态、煤层气、温度等赋存环境变化的影响,围岩的物理力学性质和变形破坏特征也相应改变,使得深埋巷道围岩的地应力分布状态有别于浅埋或硬岩巷道。因此,通过地应力测量研究深部巷道围岩地应力分布特征,具有一定理论研究价值和良好的工程应用前景。

水压致裂法在水利水电、矿山、交通等方面得到了广泛应用。水压致裂法对测量条件要求较宽,可直接测量深部岩体绝对应力状态,岩体力学参数不参与应力计算过程,测量空间大,受局部因素的影响小,且测量过程简单,成功率高<sup>[1~12]</sup>。

本文基于对淮南矿务局潘一矿-790 m 高程巷道的水压致裂法地应力测量工作,对深部矿井巷道围岩应力分布特征及其有别于传统的围岩应力分布特征的原因进行了分析和探讨,并分析了相邻巷道对围岩应力分布特征的影响,本文的研究工作可以为类似工程提供技术借鉴。

## 2 工程概况

淮南矿务局潘一矿 1983 年 12 月建成投产,设计生产能力  $3 \times 10^6$  t(目前产能已达到  $6 \times 10^6$  t),设计服务年限 133 a,分-530, -800 m 两个水平开采,现已向第二水平开拓延深。为了解潘一矿区的地应

力情况、巷道围岩应力分布特征,以及相邻两巷道对围岩应力分布的影响,在潘一矿区-790 m 东翼矸石胶带机大巷采用水压致裂法进行了现场地应力测试。

地应力测试孔布置在距-790 m 东翼矸石胶带机联巷约 60 m 处(巷道实际高程为-771 m),测试地点比-790 m 底板轨道大巷高 19 m,水平距离约为 45 m;-790 m 井底水仓巷道暂未开挖,地应力测量孔位置如图 1 所示。1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>测量孔为水平孔,布置在巷道两壁,1<sup>#</sup>钻孔轴向为 176°,近似 SN 向,3<sup>#</sup>钻孔轴向为 NW5°,2<sup>#</sup>钻孔垂直于底板,孔深均为 25 m;地应力测量钻孔布置见图 2。测孔部位岩体均为微风化砂岩,砂岩岩体完整,且附近没有大的断裂构造带通过。

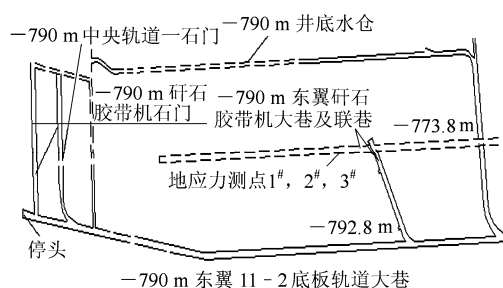


图 1 地应力测量孔位置图

Fig.1 Location map of boreholes for in-situ stress measurements

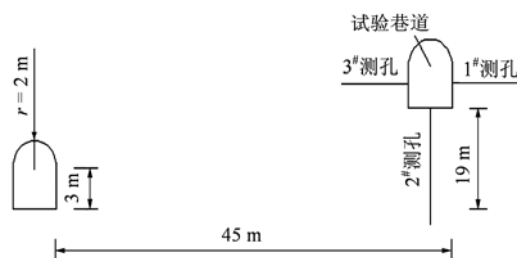


图 2 地应力测量钻孔布置示意图

Fig.2 Cross-section map of boreholes for in-situ stress measurements

本区为淮南复向斜的潘集~阜阳平缓褶皱区,区内主要构造为向东倾伏的陈桥~潘集背斜,其轴向 NW~SE。潘一矿位于潘集背斜南翼及东西部倾伏转折端南翼。地层走向为 N30°E~N60°W,倾向为 SE~SW,倾角随着地层深度增加 2°~7°,矿区以斜切张扭性断层为主,压扭性次之。张扭性断层按走向可分为两组:一组为 NEE 及 EW 向,倾向 SE 及 S,倾角 50°~75°,影响长度较长,为矿区主

体构造;另一组走向为 NW 及 NWW 向,倾向 SW 及 NE,倾角 50°~75°。矿区的主要压扭性断层走向和背斜轴轴向基本一致或二者呈 20°~30°交角的逆断层。

3 地应力测试结果及分析

为研究巷道围岩的应力分布情况,1<sup>#</sup>,3<sup>#</sup>水平钻孔从孔深 4.4 m 处开始测量,每隔 3 m 进行一次测量,1<sup>#</sup>,3<sup>#</sup>水平孔各得到 7 个测段的实测围岩应力值。2<sup>#</sup>垂直孔也布置了多个测段,但仅获得 1 个测段实测应力值。

3.1 地应力测量结果

在-790 m 东翼矸石胶带机联巷约 60 m 处的 3 个地应力测孔中,获得的有效实测地应力结果分别列于表 1~3 中。图 3 为 1<sup>#</sup>测试孔 4.4 m 测点处压力-时间关系曲线。

表 1 1<sup>#</sup>孔测试应力结果

Table 1 In-situ stress measurement results for borehole #1								
测点深度 /m	钻孔角度 /(°)	破裂压力 $P_b$ /MPa	重张压力 $P_r$ /MPa	关闭压力 $P_s$ /MPa	最大水平主应力 $\sigma_H$ /MPa	最小主应力 $\sigma_{H1}$ /MPa	自重应力 $\sigma_v$ /MPa	破裂缝走向/倾向角/倾向
4.4	水平	16.38	11.42	10.88	21.22	11.42	16.83	-
7.4	水平	22.52	18.80	14.44	24.52	14.44	16.83	176°/5°/W
10.4	水平	22.68	20.08	16.70	30.02	16.70	16.83	-
13.4	水平	22.68	19.65	16.20	28.95	16.20	16.83	-
16.4	水平	24.11	21.41	16.81	29.02	16.81	16.83	176°/6°/W
19.4	水平	25.12	19.31	16.20	29.29	16.20	16.83	-
22.4	水平	23.11	16.20	14.90	28.50	14.90	16.83	176°/3°/W

表 2 2<sup>#</sup>孔测试应力结果

Table 2 In-situ stress measurement results for borehole #2								
测点深度 /m	钻孔角度 /(°)	破裂压力 $P_b$ /MPa	重张压力 $P_r$ /MPa	关闭压力 $P_s$ /MPa	最大水平主应力 $\sigma_H$ /MPa	最小水平主应力 $\sigma_{H1}$ /MPa	自重应力 $\sigma_v$ /MPa	破裂缝方向
22	垂直孔	26.04	20.66	16.33	28.33	16.33	17.31	NE83°

3.2 地应力测量结果分析

根据潘一矿区-790 m 开采层巷道围岩地应力测试结果,进行了以下分析:

(1) 地应力量值大

表 3 3<sup>#</sup>孔测试应力结果

Table 3 In-situ stress measurement results for borehole #3								
测点深度 /m	钻孔角度 /(°)	破裂压力 $P_b$ /MPa	重张压力 $P_r$ /MPa	关闭压力 $P_s$ /MPa	最大水平主应力 $\sigma_H$ /MPa	最小主应力 $\sigma_{H1}$ /MPa	自重应力 $\sigma_v$ /MPa	破裂缝走向/倾向角/倾向
4.4	水平	14.59	11.44	9.64	17.48	9.64	16.83	-
7.4	水平	20.31	14.23	10.45	17.12	10.45	16.83	NW5°/6°/W
10.4	水平	20.31	16.37	12.03	19.72	12.03	16.83	-
13.4	水平	20.01	18.59	14.46	24.79	14.46	16.83	NW5°/3°/W
16.4	水平	21.10	14.79	12.03	21.30	12.03	16.83	-
19.4	水平	12.73	11.80	10.87	20.81	10.87	16.83	NW5°/4°/W
22.4	水平	11.26	10.23	9.46	18.15	9.46	16.83	-

注:自重应力按岩石的上覆岩层厚度计算,其岩石容重取为 22 kN/m<sup>3</sup>。

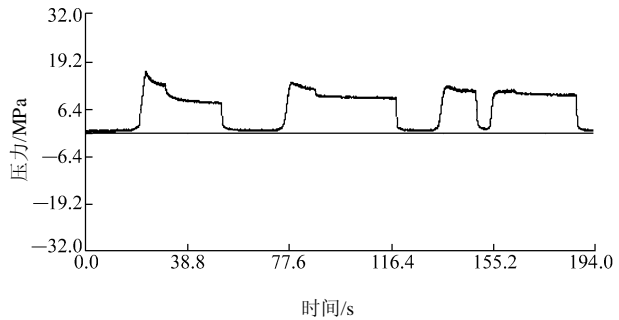


图 3 1<sup>#</sup>测试孔 4.4 m 处压力-时间关系曲线

Fig.3 Variation curve between pressure and time at depth of 4.4 m for borehole #1

根据 2<sup>#</sup>垂直孔的测试结果:最大水平主应力值为 28.33 MPa,最小水平主应力为 16.33 MPa。图 4 为地应力测量钻孔岩芯单轴抗压强度试验后岩样。岩样的平均单轴饱和抗压强度  $R_c = 164.8$  MPa。由规范<sup>[13]</sup>可知, $R_c/\sigma_{max} = 164.8/28.33 = 5.82$ ,介于 4~7 之间,故潘一矿区-790 m 开采层矿井区属高应力区。

(2) 原岩应力场以水平构造应力为主

潘一矿区-790 m 开采层矿井 1<sup>#</sup>,2<sup>#</sup>孔地应力测量结果均是: $\lambda = \sigma_H/\sigma_v$  的比值在 1.64~1.78 之间,均大于 1,表明潘一矿区-790 m 开采层矿井区水平构造应力为主,最大水平主应力方向总体在 NE83°~NE86°之间。

(3) 实测最大主应力方向

根据李 垚等<sup>[14]</sup>对潘一煤矿古今构造应力场演

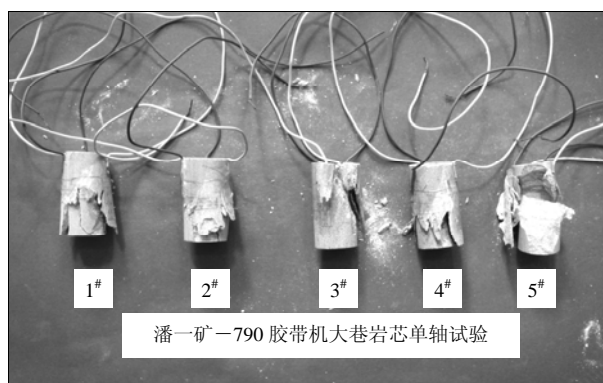


图4 砂岩单轴抗压实验后岩样

Fig.4 Rock specimens after uniaxial compressive tests

变的规律性的分析,以及走向为 NEE 及 EW 向,倾向 SE 及 S,倾角  $50^{\circ}\sim 75^{\circ}$ ,对矿区主体构造的斜切张扭性断层的力学特性分析,实测的最大水平主应力方向总体在  $NE83^{\circ}\sim NE86^{\circ}$ 之间与潘一煤矿区地质构造力学特性相吻合。

#### (4) 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>孔地应力测试结果的比较

1<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>孔为水平测量孔,测量孔岩芯均为石英砂岩,由于 3<sup>#</sup>孔受相邻下层巷道的影响,其地应力测试值比 1<sup>#</sup>孔地应力测试值小,根据表 1, 3, 3<sup>#</sup>与 1<sup>#</sup>孔最大水平主应力平均值为 0.78, 3<sup>#</sup>与 1<sup>#</sup>孔最小主应力平均值为 0.82。

根据表 1, 2 的测试结果, 1<sup>#</sup>孔最大主应力为近水平向,最小主应力为近铅直向, 2<sup>#</sup>孔的最大主应力、最小主应力均为水平向。剔除 1<sup>#</sup>孔松动、塑性区的测试值其最大水平主应力的平均值为 28.94 MPa, 2<sup>#</sup>与 1<sup>#</sup>孔最大水平主应力的比值为 0.98。

1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>孔测试结果的比较表明:相邻下层巷道对 3<sup>#</sup>孔的地应力测试结果影响大,而不受相邻下层巷道影响的 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>孔最大水平主应力值几乎相等,这也证明了测试结果是可靠的。

#### (5) 水平测量孔最小主应力与自重应力的比较

由于 3<sup>#</sup>孔的测试结果受相邻下层巷道的影响,分析时仅采用 1<sup>#</sup>孔的实测数据。由表 1 可知, 1<sup>#</sup>孔最大水平主应力近水平向。由于 1<sup>#</sup>孔为水平孔,根据实测结果最小主应力  $\sigma_{h1}$  方向为近铅直向。为了比较实测的最小主应力  $\sigma_{h1}$  与自重应力  $\sigma_v$  的关系,剔除 1<sup>#</sup>测量孔围岩松动、塑性区影响即孔深小于 10.44 m 的测量数据,得到最小主应力  $\sigma_{h1}$  平均值为 16.03 MPa。自重应力  $\sigma_v$  等于上覆岩体重力,岩体容重取值为  $22 \text{ kN/m}^3$ ,岩体埋深 790 m,计算得到

自重应力  $\sigma_v = 16.83 \text{ MPa}$ 。实测值的最小主应力  $\sigma_{h1}$  与自重应力  $\sigma_v$  之比为  $\sigma_{h1} / \sigma_v = 0.95$ ,两者差值仅为 5%,这表明水平孔实测的最小主应力  $\sigma_{h1}$  为岩体的自重应力,同时也说明水压致裂法测量地应力是可靠、有效的。实测应力  $\sigma_{h1}$  小于计算值  $\sigma_v$  原因有 2 个:一是因为 -530 m 水平煤层已开采,已卸掉了一部分载荷;二是岩体的容重为估算值,也对结果的准确性带来了一定影响。

#### (6) 巷道围岩松动塑性区

巷道开挖以后,原有的天然应力状态受到扰动,围岩应力重新分布,切向应力增大的同时,径向应力减小,并在巷道壁处达到极限。这种变化促使围岩向巷道临空面形变,围岩本身的裂隙产生变形,引起岩体扩容,使得岩体的力学性质恶化。

在围岩应力条件下,切向应力在洞壁附近发生集中,致使这一区域岩体屈服而进入塑性状态。围岩出现塑性区后,使应力集中区从岩壁向纵深偏移,当应力集中超过围岩的屈服强度时,又将出现新的塑性区,如此逐层推进,使塑性区不断向纵深发展,直至达到平衡。

董燕君等<sup>[15]</sup>对洞室围岩松动区变化情况进行了测试研究,相隔 9 个月其地下洞室围岩的松动区范围由原来的 2.5~4.0 m 向纵深发展到 12.6~14.0 m,在 9 个月时间内围岩松动区扩大了近 10 m。其围岩的声波速度也明显降低。

巷道围岩松动塑性区是以  $\sigma_{\theta}$  (环向应力) 达到最大值为分界点,巷道壁到  $\sigma_{\theta}$  最大值为围岩松动、塑性区,其他围岩区为弹性区。1<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>孔地应力测量结果表明围岩松动、塑性区分别为 10.4, 13.4 m。3<sup>#</sup>孔比 1<sup>#</sup>孔的围岩松动、塑性区大其主要原因是受相邻下层巷道的影响。

#### (7) 巷道围岩应力的分布情况

对于圆形巷道的轴对称问题,线弹性解析解表明,  $\sigma_{\theta}$  的最大值位于巷道周边,  $\sigma_r$  (径向应力) 的最小值也位于巷道周边。矩形巷道围岩轴对称问题的线弹性解析解与圆形巷道的轴对称问题线弹性解析解有一些类似之处<sup>[16]</sup>。1<sup>#</sup>孔实测的  $\sigma_{h1}$  相当于  $\sigma_{\theta}$ , 测量结果表明: 1<sup>#</sup>孔巷道围岩应力向纵深方向逐渐增加,在大约 2 倍洞径处达到最大值,实测的深埋巷道围岩的应力分布情况与弹性理论分析的分布情况有较大的差异。图 5 为最大、最小水平主应力沿测孔深度的变化情况。

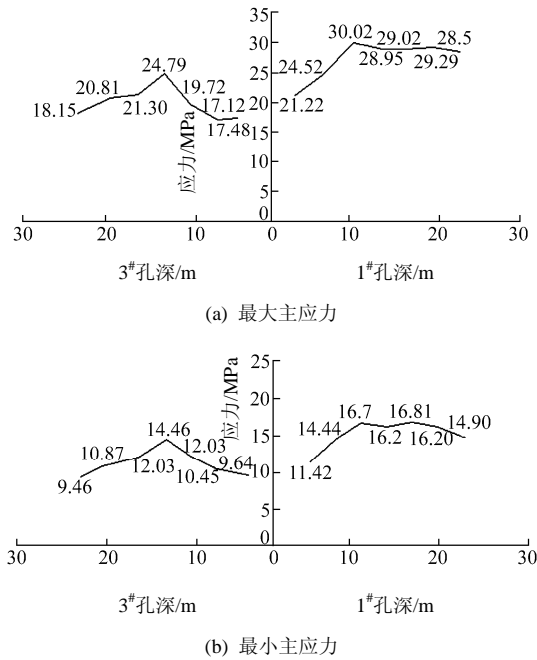


图5 主应力沿测孔深度的变化曲线

Fig.5 Variation of principal stress with depth of borehole

图5的围岩应力分布情况表明,围岩塑性区在向纵深发展过程中,其围岩应力集中度是逐渐降低的。3#孔由于受相邻下层巷道的影响,其应力水平比1#孔低得多。

#### (8) 相邻下层巷道对巷道围岩应力的影响

为了研究相邻下层巷道对围岩应力分布的影响,3#孔布置在距-790 m东翼矸石胶带机联巷约60 m处(巷道实际高程为-771 m),测试地点比-790 m底板轨道大巷高19 m,东翼矸石胶带机大巷与底板轨道大巷水平距离大约为45 m。

测量结果表明底板轨道大巷对3#孔应力值影响大。底板轨道大巷对围岩应力分布的影响范围大于6倍洞径,远远超过根据传统弹性力学所计算的3倍洞径。

## 4 结 论

(1) 水压致裂法是目前最常用的地应力测量方法。水压致裂法对测量条件要求较宽松,能够直接测量深部岩体的绝对应力状态,岩体力学参数不参与应力计算,测量应力空间范围较大,受局部因素影响小,且其测量过程简单,成功率高。

(2) 潘一矿-790 m东翼矸石胶带机大巷的水压致裂法地应力测试结果表明:该区以构造应力场

为主,最大原岩水平主应力值大于28.33 MPa,岩石单轴饱和抗压强度与最大水平主应力比值为5.82,属高应力区。

(3) 围岩应力分布特征研究表明巷道围岩存在松动、塑性区,在高地应力作用下巷道围岩塑性区从洞周向深部逐渐扩展,同时围岩应力也在塑性区向纵深方向逐渐增大,受围岩软弱影响塑性区较大,围岩应力在大约2倍洞径处应力值达到最大,然后再降低并趋于原岩应力。

(4) 实测结果表明相邻间的底板轨道大巷对顶板围岩应力分布的影响范围大于6倍洞径,有别于传统弹性力学分析的3倍洞径的影响范围。

## 参考文献(References):

- [1] 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 91 - 99.(ZHOU Hongwei, XIE Heping, ZUO Jianping. Research advances of rock mechanics under high stress[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 91 - 99.(in Chinese))
- [2] 蔡美峰, 乔 兰, 于 波. 金川二矿区深部地应力测量及其分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 414 - 418.(CAI Meifeng, QIAO Lan, YU Bo. Results and analysis of in-situ stress measurement at deep position of mining area No.2 of Jinchuan Nickel Mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(4): 414 - 418.(in Chinese))
- [3] 刘允芳, 罗超文, 龚壁新, 等. 岩体地应力与工程建设[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2000.(LIU Yunfang, LUO Chaowen, GONG Bixin, et al. Geostress of rock mass and engineering construction[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2000.(in Chinese))
- [4] 白世伟, 李光煜. 二滩水电站坝区岩体应力场研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1982, 1(1): 45 - 56.(BAI Shiwei, LI Guangyu. Study of stress field of Ertan hydroelectric station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1982, 1(1): 45 - 56.(in Chinese))
- [5] 郭启良, 伍法权, 钱卫平, 等. 乌鞘岭长大深埋隧道围岩变形与地应力关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2 194 - 2 199.(GUO Qiliang, WU Faquan, QIAN Weiping. Study of relationship between deformation of surrounding rock and in-situ stress in Wushaoling deep-buried rail tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2 194 - 2 199.(in Chinese))
- [6] 郭启良, 安其美, 赵仕广. 水压致裂应力测量在广州抽水蓄能电站设计中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 828 -

- 832.(GUO Qiliang, AN Qimei, ZHAO Shiguang. Application of hydraulic fracturing test to design of Guangzhou pumped storage Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 828 - 832.(in Chinese))
- [7] 王学潮, 郭启良, 张 辉. 青藏高原东北缘水压致裂地应力测量[J]. 地质力学学报, 2000, 6(2): 64 - 70.(WANG Xuechao, GUO Qiliang, ZHANG Hui. Crustal stress measurement in northeastern Qingzang plateau by hydrofracturing[J]. Journal of Geomechanics, 2000, 6(2): 64 - 70.(in Chinese))
- [8] 李方全, 刘 鹏, 张 钧. 原地应力测量对某核废料处置场场地评价的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(1): 55 - 62.(LI Fangquan, LIU Peng, ZHANG Jun. Application of in-situ stress measurements to assessment of a site for nuclear waster disposal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(1): 55 - 62.(in Chinese))
- [9] 祁英男, 李方全, 毛吉震. 万家寨水利枢纽水压致裂应力测量结果和分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 188 - 191.(QI Yingnan, LI Fangquan, MAO Jizhen. The hydrofracturing in-situ stress measurement and analysis of Wanjiashai water control project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 188 - 191.(in Chinese))
- [10] 吴满路, 廖椿庭, 张春山, 等. 红透山铜矿地应力测量与分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 3 943 - 3 947.(WU Manlu, LIAO Chunting, ZHANG Chunshan, et al. In-situ stress measurement and analysis of its distribution law in Hongtoushan copper mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 3 943 - 3 947.(in Chinese))
- [11] 刘亚群, 罗超文, 李海波. 南水北调西线工程区地应力测量及地应力场特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3 620 - 3 624.(LIU Yaqun, LUO Chaowen, LI Haibo. Study of in-situ stresses measurements and characteristics of in-situ stresses field in West Route of South to North Water Transfer Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3 620 - 3 624.(in Chinese))
- [12] 肖本职, 罗超文, 刘元坤. 鄂西地应力测量与隧道岩爆预测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4 472 - 4 477.(XIAO Benzhi, LUO Chaowen, LIU Yuankun. In-situ stress measurement and prediction analysis of tunnel rockburst in West Hubei Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4 472 - 4 477.(in Chinese))
- [13] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50218 - 94 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50218 - 94 Standard of engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1995.(in Chinese))
- [14] 李 垚, 朱 文, 程海燕. 潘一煤矿井田 11 - 2 煤层小构造分布规律研究[J]. 煤田地质与勘探, 2003, (5): 17 - 20.(LI Yao, ZHU Wen, CHENG Haiyan. Research on distribution regularities of small structures in coal seam 11 - 2, Panyi Coal Mine[J]. Coal Geology and Exploration, 2003, (5): 17 - 20.(in Chinese)).
- [15] 董燕君, 黄纸鹏, 陈赛超. 某地下洞室围岩松动区深度的测试与分析[J]. 岩土工程技术, 2009, 23(1): 44 - 47.(DONG Yanjun, HUANG Zhipeng, CHEN Saichao. Test and analysis of surrounding rock mass disturbed zone of underground cavern[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2009, 23(1): 44 - 47.(in Chinese))
- [16] 王学滨, 潘一山, 李英杰. 围压对巷道围岩应力分布及松动圈的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(6): 962 - 966.(WANG Xuebin, PAN Yishan, LI Yingjie. Effect of confining pressure on distributions of horizontal and vertical stresses around rectangular roadway and broken rock zone[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(6): 962 - 966.(in Chinese))

## 下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章:

- (1) 边坡可靠度分析的随机响应面法及程序实现;
- (2) 锦屏一级水电站大理岩蠕变试验与流变模型选择;
- (3) 非贯通节理的岩桥弱化学模型研究;
- (4) 分段柔性接头地铁隧道适应地裂缝大变形的模型试验研究;
- (5) 泥质软岩蠕变机制研究;
- (6) 深埋隧洞 TBM 施工过程围岩损伤演化声发射试验;
- (7) 基于光纤光栅传感技术的边坡原位测斜及稳定性评估方法;
- (8) 散粒体锚杆加固的作用机制研究;

土工基础