

引黄隧洞地应力测量*

王连捷 丁原辰 刘琦胜 邵兆刚 谭成轩 王 薇

(中国地质科学院地质力学研究所)

陈贵忠

(北京大学)

摘 要 本文应用水压致裂地应力测量法和声发射法,在山西太原引黄工程的两个钻孔中进行了地应力测量,得到了可靠的数据,为隧洞设计提供了依据。文章首先对水压致裂测量方法进行了介绍,然后给出了测量结果。并对隧洞断面的设计和岩爆问题进行了讨论。根据岩爆发生的准则指出,若隧洞走向与最大水平主应力平行,且选择适当断面,将减小岩爆发生的可能性。

关键词 地应力测量 构造应力场 声发射

0 前言

黄河水源太原市城市给水工程,对缓解太原市供水紧张情况,加快太原市的工业发展和经济腾飞,改善人民生活具有重要意义。为此我们在引水隧洞工程地区的两个钻孔(孔深达421.9m),使用轻便水压应力测量系统和声发射法开展了地应力测量工作,为工程稳定性设计提供依据。根据应力测量结果,本文还讨论未来开挖过程中岩爆的可能性及隧洞最佳断面的选择问题。

1 水压致裂地应力测量的方法

水压致裂是近年来发展起来的能够测量地壳深部应力的有效方法。1957年哈伯特(hubbert)等作者发表了水压致裂的理论研究^[1]。海姆逊(Haiimson)等人分析了压裂液渗入的影响^[2],并应用于实际地应力测量。由于操作简便,且无须知道岩石的弹性参量,因此自60年代以来在世界范围内得到了广泛应用。

水压致裂法测量应力时,是利用一对可膨胀的橡胶封隔器,在选定的钻孔测量深度上,封隔一段裸露的钻孔(图1),然后通过泵入流体对这段钻孔增压,直至钻孔围岩产生破裂。继续加压使破裂扩展。若停止注液增压,并保持压裂回路密闭,则裂缝立即停止延伸,趋于闭合。当

* 张利容、袁嘉音、汪西海、彭 华、葛增军等同志参加了部分工作。

达到刚刚保持裂缝张开的平衡压力时,叫做瞬时关闭压力 P_s ,它等于垂直于裂缝面的最小水平主应力^[3]。

如果卸掉封隔段中的压力,使裂缝闭合,然后再次对封隔段加压,使破裂重新张开,可得到破裂重新张开的压力 P_r 。

在压裂过程中,记录压力随时间的变化,得出压力时间曲线如图 2。由图 2 可以找出瞬时关闭压力 P_s ,重张压力 P_r ,以及破裂压力 P_f 。并由以下各式计算主应力及抗张强度 T 。

最小水平主应力 σ_h 为:

$$\sigma_h = P_s \tag{1}$$

最大水平主应力 σ_H 为:

$$\sigma_H = 3P_s - P_r - P_0 \tag{2}$$

式中 P_0 为孔隙压力。

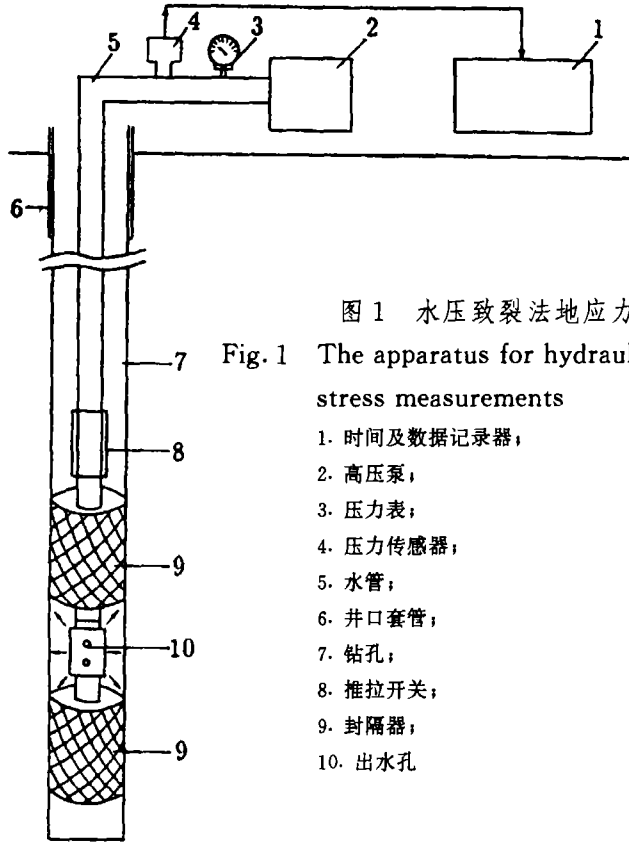


图 1 水压致裂法地应力测量

Fig. 1 The apparatus for hydraulic fracturing stress measurements

- 1. 时间及数据记录器;
- 2. 高压泵;
- 3. 压力表;
- 4. 压力传感器;
- 5. 水管;
- 6. 井口套管;
- 7. 钻孔;
- 8. 推拉开关;
- 9. 封隔器;
- 10. 出水孔

铅直应力 σ_v 可根据上覆岩层的重力计算,即:

$$\sigma_v = \rho g H \tag{3}$$

式中 ρ 为岩石的密度, g 为重力加速度, H 为测量深度。

主应力的方位可根据印模器确定。

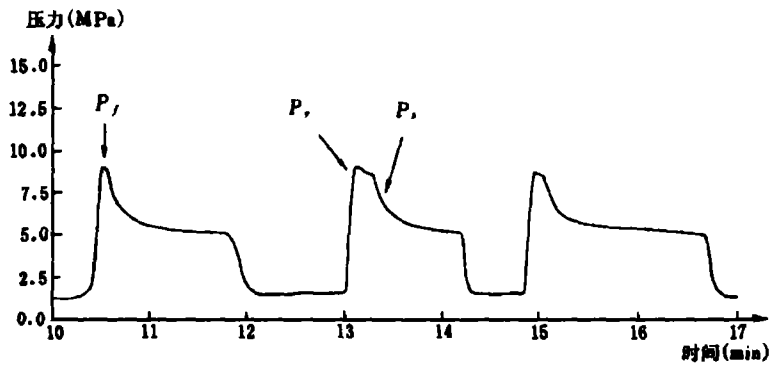


图 2 水压致裂过程中的压力—时间曲线

Fig. 2 The recorder of pressure-time obtained from hydrofracturing stress measurement

P_1 . 岩层破裂临界压力; P_2 . 瞬时关闭压力; P_3 . 破裂重张压力

2 测孔位置与区域地质背景

两个钻孔均布设在黄河水源太原市给水工程隧洞轴线上(图 3)。位于太原西山地区,地层为奥陶系灰岩。1 号孔位于马头水乡;2 号孔位于 1 号孔东南约 800m 处。

区域构造位置处于祁吕贺兰山字型前弧东翼与新华夏第三隆起带的复合部位。断裂或褶皱走向大致为 NE—NNE 向、近 SN 向、近 EW 向和 NW 向四组。诸种构造形迹在太原西山和东山地区较为明显,而在盆地内部则均为隐伏构造。

主要断裂带有:古交断裂带、晋祠—交城断裂带、王封断裂带、碾底断裂带、西铭—柴村断裂带、郝村断裂带等。褶皱如岭底向斜、镇城底—清除向斜、北石槽背斜、杨家峪背斜、黄岭背斜等。东西向构造的一部分是区内最为古老的构造,其构造形迹主要是一系列走向东西、紧密排列的压性断裂和其间发育的褶皱构造。除了东西向的古老构造外,在盆地内还有马坡断裂带、东焉断裂、三给断裂带等。它们隐伏于新生界之下,在新生代仍有活动,多为张性正断层,往往构成 EW 走向的地垒构造。SN 向断裂在马庄—上白泉—李家庄一带发育。在盆地内部尚有 SN 向的隐伏断裂带,往往形成地垒构造,如棋子山地垒等。

3 水压致裂地应力测量资料的解释

3.1 瞬时关闭压力 P_2 的确定

水压致裂理论表明,最小水平主应力 σ_3 等于瞬时关闭压力 P_2 。因此,水压致裂测量资料解释的关键在于如何正确地确定瞬时关闭压力 P_2 。

到目前为止,确定瞬时关闭压力的方法有近十种^[4]。如:拐点法、切线法、双切线法、半对数法、非线性回归法(指数压力衰减法)、流量—压力法、 $P-\sqrt{t}$ (压力时间开方法)、低流量泵进法等。根据测得的压力—时间曲线的形态,我们对此次引水工程两个钻孔的所有测量资料均统一采用切线法^[5]。

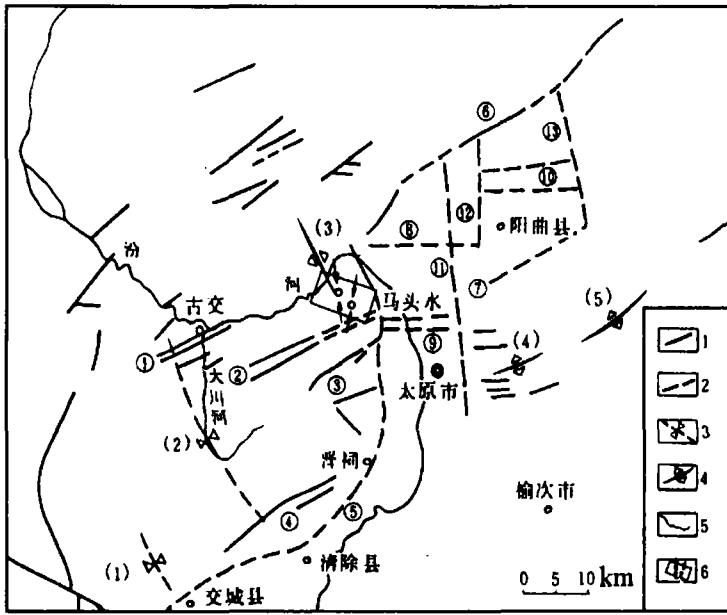


图3 太原地区地质构造略图

Fig. 3 Geological sketch in Taiyuan district

1. 断裂; 2. 隐伏断裂; 3. 向斜; 4. 背斜; 5. 河流; 6. 工作区及测点的主应力方向

断裂构造: ①古交断裂; ②王封断裂; ③西铭—柴村断裂; ④碾底断裂; ⑤晋祠—交城断裂; ⑥卧虎山断裂;

⑦郝村断裂; ⑧东焉断裂; ⑨三给断裂; ⑩, 马坡断裂; ⑪城关断裂; ⑫棋子山断裂; ⑬脚山断裂

褶皱构造: (1) 岭底向斜; (2) 镇城底—清徐向斜; (3) 北石槽背斜; (4) 扬家峪背斜; (5) 黄岭背斜

3.2 重张压力 P_r 的确定

由于岩石抗拉强度不易准确确定, 我们采用破裂重张压力 P_r 来确定最大水平主应力。目前确定重张压力 P_r 的方法主要有: (1) 曲线斜率变化法; (2) 曲线重叠法。本次试验中获得的曲线形态较好, 故采用曲线斜率变化法。孔壁破裂前的曲线上升过程基本为线性增长, 即压力上升速度保持稳定, 当压力上升速率发生突变时, 即从上升曲线的线性部分作切线, 曲线偏离切线的那一点即为重张压力。

4 水压致裂应力测量结果

4.1 1号孔应力测量结果

典型测段的压力—时间记录曲线如图4。得到的各测段破裂压力, 重张压力, 关闭压力, 主应力等如表1。1号钻孔共进行了3次印模, 所得最大主应力方向为 $N14^{\circ}W$, $N12^{\circ}W$ 和 $N10^{\circ}W$ 。平均为 $N12^{\circ}W$ 。

4.2 2号孔应力测量结果

典型测段的压力—时间记录曲线如图5。得到的各测段应力测量结果见表2。2号孔同样进行了3次印模, 所得的最大水平主应力方向分别为: $N25^{\circ}E$, $N27^{\circ}E$, $N10^{\circ}W$, 其统计平均值为 $N14^{\circ}E$ 。

表 1 1号孔应力测量结果

Table 1 Results of stress measurement from No. 1 hole

测段(m)	P_o (MPa)	P_f (MPa)	P_r (MPa)	P_t (MPa)	σ_v (MPa)	σ_h (MPa)	σ_H (MPa)	T (MPa)	σ_H 的方向
146.22	0	11.5	6.5	5.3	3.9	6.5	14.2	6.2	N14°W
155.0	0	8.1	6.2	4.1	4.1	6.2	14.5	4.0	
163.0	0	10.4	7.0	5.4	4.3	7.0	15.6	5.0	N12°W
186.75	0	11.9	7.3	5.9	5.0	7.3	16.0	6.0	N10°W
192.0	0	12.2	7.9	6.1	5.1	7.9	17.1	6.1	
212.0	0	13.9	8.1	6.4	5.6	8.1	17.9	7.5	

注:岩石密度为 $\rho = 2.66 \times 10^3 \text{kg/m}^3$

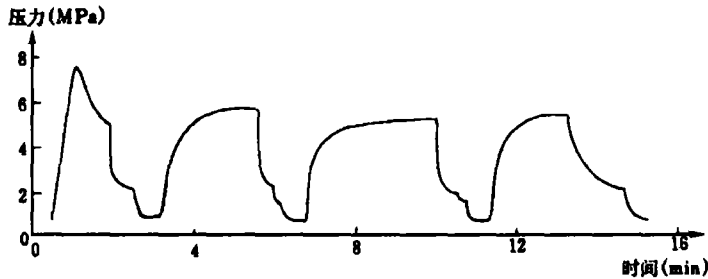


图 4 1号孔典型测段压力—时间记录曲线

Fig. 4 The recorder of pressure-time of typical interval from No. 1 hole

表 2 2号孔应力测量结果

Table 2 Results of stress measurement from No. 2 hole

测段(m)	P_o (MPa)	P_f (MPa)	P_r (MPa)	P_t (MPa)	σ_v (MPa)	σ_h (MPa)	σ_H (MPa)	T (MPa)	σ_H 的方向
85.5	0	10.1	4.5	3.4	2.2	4.5	10.1	6.7	N20°E
98.83	0	7.8	4.5	3.3	2.5	4.5	10.2	4.5	
116.05	0	12.2	6.6	7.0	3.1	6.6	12.8	5.2	
124.49	0	10.4	5.7	5.5	3.3	5.7	11.6	4.9	
135.31	0	13.6	5.7	4.0	3.6	5.7	13.1	9.6	N27°E
165.0	0	11.0	6.8	3.9	4.4	6.8	15.2	7.1	N10°W
170.0	0	18.0	7.3	5.5	4.5	7.3	16.5	12.5	
282.66	0	13.0	8.8	6.3	7.5	8.8	20.1	6.7	
303.12	0	13.8	8.6	6.1	8.1	8.6	19.7	7.7	

注:岩石密度为 $\rho = 2.66 \times 10^3 \text{kg/m}^3$

4.3 两个钻孔所测地应力的综合平均值

两个钻孔相距约 800m。应力状态变化不大,测值和方向都比较接近,结果是可靠的。将两个钻孔的数据统一进行处理,得到综合平均应力状态(图 6)。

两个钻孔得到的地应力随深度变化的回归方程如下:

$$\sigma_H = 6.87 + 0.0479H \text{ (MPa)} \quad \text{相关系数 } 0.95$$

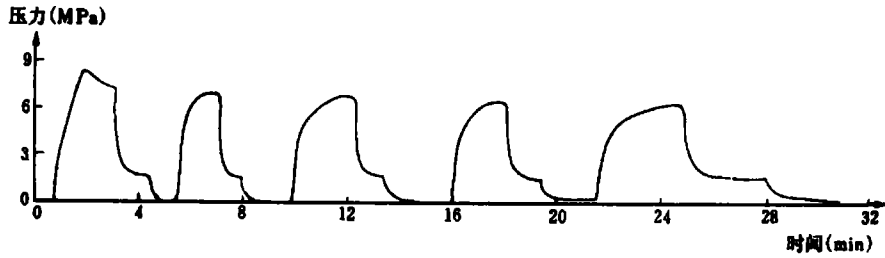


图5 2号孔典型测段压力—时间记录曲线

Fig. 5 The recorder of pressure-time of typical interval from No. 2 hole

$$\sigma_h = 3.45 + 0.0196H \text{ (MPa)}$$

相关系数 0.91

$$\sigma_v = 0.0266H \text{ (MPa)}$$

式中 H 为深度(m)。

两个钻孔所得主应力方向的平均值为 $N1^\circ E$ ，即主方向为 SN 向(图3)。

5 声发射法地应力测量结果

声发射法共进行了5个测点,17个样品的测试。将其测量结果与水压法测量结果画在同一曲线上,如图6。可以看出二者随深度的变化是非常一致的。两种方法的可对比性说明测量结果是可靠的。

6 地应力的基本特征与500m深处的应力状态

由上述地应力测量结果可以看出地应力的基本特征:

(1) 地应力以水平挤压应力为主。水平应力大于铅直应力,即: $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ 。

(2) 地应力随深度线性增加。线性相关系数,最大主应力为0.95,最小主应力为0.91。说明地应力随深度增加具有很好的线性相关性。

(3) 在500m深处,即隧洞的设计深度,最大水平主应力、最小水平主应力及铅直应力分别为30.8MPa,13.3MPa,13.3MPa。最大水平主应力与铅直应力之比约为2.3。

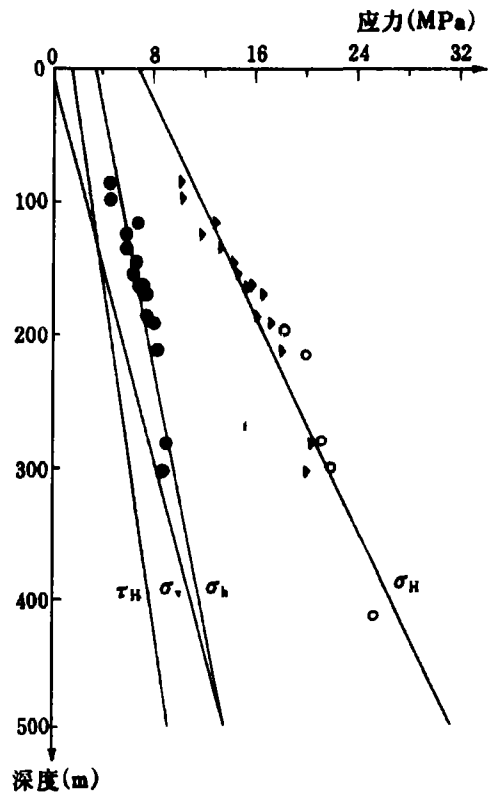


图6 1号和2号两个钻孔地应力随深度的变化

Fig. 6 The change of rock stress with depth of No. 1 and No. 2 holes

○实测最小主应力;▲实测最大主应力;●声发射得到的最大主应力; σ_H . 最大水平主应力回归曲线; σ_h . 最小水平主应力回归曲线; σ_v . 铅直应力回归曲线; τ_H . 最大水平剪应力回归曲线

(4) 最大水平主应力方向为近 SN 向。这与本区 EW 向的挤压构造相一致。

7 隧洞走向及断面形状的选择

从地应力测量结果来看,本区最大主应力是水平的,最小主应力是铅直的。地下隧道,厂房等的稳定性主要取决于垂直于隧洞轴线方向的水平应力与铅直应力之比及他们的绝对值大小。当水平应力大于铅直应力时,隧洞轴线应选在最大水平主应力方向上。当铅直应力大于水平应力时,隧洞轴线应选在最小主应力方向上。根据本区的地应力状态隧洞轴线在近南北方向时最稳定。但在实际工作中,隧洞轴线是难以任意选择的。这时,需要通过选择隧洞的断面来提高工程的稳定性。

在一定的地应力状态下,隧洞断面的形状对稳定性有很大影响,断面形状不同,隧洞周边的诱发应力不同。对某一既定的应力场而言,开挖体断面形状选择的的目的之一是使隧洞周边的压应力达到均匀分布。能获得均匀压应力分布的开挖体形状通常是椭圆形隧道。其长轴和短轴之比等于原岩应力之比。根据设计,本引水隧洞走向近 N70°W,此时在隧洞的横断面内水平应力与铅直应力之比近于 2。因此,隧洞断面应选为椭圆形或近似椭圆形状。且断面长轴应该是水平的。如果选择其他断面形态,则应加强支护。

8 岩爆问题

在隧洞开挖时,隧洞表面的岩石由原开挖前的三维应力状态转为二维应力状态。其应力值显著增加。在岩石完整、新鲜、坚硬的情况下,由于积聚相当多的弹性能,因而也就孕育着产生岩爆甚至冲击地压的可能。由于隧洞的设计走向与实测地应力最大主应力方向近于垂直,加上测区实测结果显示该区属高地应力区,因而岩爆问题就应认真对待。根据岩爆发生的临界应力判据^[1], $\sigma_\theta \geq (0.19 - 0.40)\sigma_c$,式中 σ_θ 为围岩切向应力, σ_c 为发生岩爆的临界应力。式中的系数需根据围岩应力的组合状态而定。根据这个判据笔者可以确定发生岩爆的可能性。在该区 500m 深处的地应力状态下,如果隧洞选为圆形则位于顶板处的最大切向应力 $\sigma_\theta = 73.4\text{MPa}$,高于发生岩爆的临界值。因此,在隧道开挖过程中可能出现岩爆,施工中应予以注意。当隧洞轴向平行于最大主应力方向,或者选择合理断面形状、合理施工顺序,将大大降低产生岩爆的可能性。

9 结论

(1) 本文使用水压致裂法和声发射法在太原市引黄工程隧洞两个钻孔中进行了地应力测量。测量深度达 420m。两种方法所得结果具有很好的一致性,说明测量结果是可靠的,为引黄隧洞工程稳定性设计提供了科学依据。

(2) 本区所揭示的地应力场的基本特征如下:

(a) 地应力以水平应力为主导,水平应力大于铅直应力。

(b) 地应力随深度线性增加,其回归方程:最大主应力为 $\sigma_H = 6.87 + 0.0479H$,最小主应力为 $\sigma_h = 3.45 + 0.0196H$ 。

(c) 据实测结果,外推至开挖隧洞 500m 深处,最大水平主应力为 30.8MPa,最小水平主

应力为 13.3MPa, 铅直应力为 13.3MPa。最大水平主应力方向为近 SN 向。

(3) 本区属高应力区, 应特别注意隧洞走向及断面形状的选择, 以提高稳定性。隧洞走向应尽量靠近最大主应力方向。根据本区水平应力为主的特点, 隧洞断面的形状以近似椭圆且长轴水平为最佳。若为其他形状, 其长轴也应尽量与水平面平行, 否则应加强支护。

(4) 当隧洞的走向近于 N70°W 设计时, 由于隧洞所受侧压力较大, 有发生岩爆的可能。调整隧洞走向使之尽量与最大水平主应力方向靠近, 并选择合理断面形状、合理施工顺序, 岩爆的可能性将大大降低。

在本项工作中, 得到了山西省太原市自来水公司, 冶金部 316 地质队的大力支持与帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Hubert M K and Willis D G, Mechanics of hydraulic fracturing. Trans. AIME210, 1957.
- 2 Haimson B C, Hydraulic fracturing in porous and nonporous rock and potential for determining in situ stresses at great depth, ph. D. Thesis, University of Minnesota, 1968.
- 3 任希飞、王连捷, 深部地应力测量方法, 水文地质与工程地质(二), 北京: 地质出版社, 1985.
- 4 Haimson B C and M Y Lee, Development of wireline hydrofracturing and its use at the Monticello Reservoir, Final Report to USGS Contract 14-08-0001-20537, 1984.
- 5 Gronseth J M and P R Kry, Instantaneous shut-in pressures and its relationship to the Minimum in situ stress. Proc. Hydraulic Fracturing Stress Measurements Workshop (Edited by Zoback M D and Haimson B C), National Academy Press, Washington, D C. 55-60, 1983.
- 6 侯发亮等, 地下洞室岩爆与围岩应力的关系, 复杂岩石的建筑物国际学术讨论会文集。北京: 科学出版社, 1986.

ROCK STRESS MEASUREMENTS IN A PLANNED TUNNEL FOR DIVERSION OF WATER FROM THE YELLOW RIVER

Wang Lianjie Ding Yuanchen Liu Qisheng Shao Zhaogang Tan Chengxuan Wang Wei

(*Institute of Geomechanics CAGS*)

Chen Guizhong

(*Science and technology University in Beijing*)

Abstract Both hydrofracturing method and acoustic emission method were employed for stress measurements at depth of 360m and 420m respectively in two drill holes at Taiyuan, Shanxi. The results obtained will be used in the tunnel design for the water diversion project. In this paper the two methods are first described. From the measurements, the design of the planned tunnel and the problem of rock burst are also discussed. It is shown that if the strike of the tunnel is taken to be parallel to the maximum horizontal stress and a right shape for the tunnel section is adopted, the probability of rock burst will be reduced.

Key words Rock stress measurement, Tectonic stress field, Acoustic Emission method

第 一 作 者 简 介

王连捷, 男, 1933 生, 研究员。1960 年毕业于北京地质学院物探系。1963 年研究生毕业。主要从事岩石力学, 地应力测量, 工程力学和构造应力场方面的研究工作。通讯地址: 北京市海淀区民族学院南路 11 号地质力学研究所。邮政编码: 100081。