

文章编号: 1006-6616 (2005) 04-0386-08

# 新疆西部地应力测量在隧道工程中的应用

马秀敏, 彭 华, 李金锁

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

**摘 要:** 随着西部地区建设的投资力度逐年加大, 地应力测量与研究工作的研究工作越来越显得重要。通过在新疆西部拟建精伊霍铁路北天山越岭隧道(最大埋深约 1100m)工程区进行的水压致裂地应力测量, 获得了北天山地区应力场的主应力值及其方向。本文根据地应力测量结果, 对工程区应力场的应力状态进行了研究, 分析了隧道围岩的稳定性和地质灾害发生的可能性。

**关键词:** 水压致裂; 地应力; 隧道稳定性; 地质灾害

**中图分类号:** TU459<sup>\*</sup>.4

**文献标识码:** A

## 0 前言

精伊霍(精河—伊宁—霍尔果斯)铁路位于新疆维吾尔自治区西部博尔塔拉蒙古自治州和伊犁哈萨克自治州境内, 属于国家和地方合资建设的二级铁路, 将成为“欧亚大陆桥”少有的铁路通道。“精伊霍”铁路全长 295.725km, 总投资 62 亿元, 计划于 2008 年竣工。精伊霍铁路最大的控制性工程——长 13.61km、埋深达 1100m 的北天山越岭隧道工程, 目前在全国铁路隧道中位居第三。

精伊霍铁路北天山越岭隧道位于新疆西部天山北麓, 横穿婆罗科努山, 地表标高约 1597~2730m。该隧道工程区地处天山深处, 地质地形复杂多变, 区内新构造运动强烈, 断裂构造以 EW 向最为发育, 施工难度较大。为了进行隧道的合理设计, 使隧道施工安全和长期稳定, 必须了解工程区的地应力状态。

北天山越岭隧道主要通过的地层有第三系、石炭系和奥陶系, 其围岩主要为砾岩、灰岩、凝灰岩、玄武岩及英安斑岩等。

工程采用水压致裂技术对隧道沿线所布置的 3 个测试钻孔进行了地应力测量。根据测试成果, 确定了隧道工程区现今地壳应力状态, 分析了隧道围岩的稳定性和岩爆发生的可能性。

收稿日期: 2005-09-30

基金项目: 中国地质调查局“南水北调西线第一期工程地壳稳定性调查评价”(200113000092)项目资助。

作者简介: 马秀敏 (1978-), 男, 河北邢台人, 在读硕士研究生, 地质工程专业, 主要从事地应力测量、地质灾害、围岩稳定性和岩石力学与工程施工等方面的研究工作, (010) 68486797, E-mail: maxiumin2@163.com。

# 1 水压致裂地应力测量的原理

## 1.1 测量原理

水压致裂地应力测试方法是近年来发展起来的一种深部地应力测试方法。Hubbert 等(1957)曾报导过水压致裂的理论研究成果。Haimson 等分析了压裂液渗入的影响,并应用于实际地应力测量。由于它具有能够测量深部应力(可达地下数千米)、操作方便、经济实用、不需要精密仪表、测试周期短、测量直观,适用条件比较广泛等优点,已经在国内外得到广泛应用<sup>[1]</sup>。

水压致裂法地应力测量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,然后通过泵入液体对这段钻孔增压,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。当达到刚刚保持裂缝张开的平衡压力时,称瞬时关闭压力  $P_c$ ,它等于垂直于裂缝面的最小水平主应力<sup>[2]</sup>。

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。从曲线中可以得出瞬时关闭压力  $P_c$ ,重张压力  $P_r$ ,以及破裂压力  $P_b$ ,并由以下各式计算主应力。

最大水平主应力计算如下式:

$$\sigma_H = 3P_c - P_r - P_o \quad (1)$$

最小水平主应力计算如下式:

$$\sigma_h = P_c \quad (2)$$

式中:  $P_o$ ——孔隙压力。

铅直应力可根据上覆岩层的重力计算如下式:

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

式中:  $\rho$ ——岩石的密度;  $g$ ——重力加速度;  $H$ ——测量深度。

水平主应力的方位根据印模器确定。

## 1.2 瞬时关闭压力的确定

在水压致裂法地应力测量中,最小水平主应力  $\sigma_h$  等于裂缝闭合压力  $P_c$ ,已被大量的实验和理论研究所证实,只是闭合压力识别方法对最小水平主应力的测量结果有不同的影响<sup>[3]</sup>。因此,合理地识别水力压裂试验曲线上闭合压力点对提高水力压裂法地应力测量的精度十分重要。

F. Guo 等人在总结前人研究成果的基础上,对其中的 8 种识别方法进行了室内实验研究,研究表明:  $P_w - \lg(t + \Delta t) / \Delta t$  法;  $P_w - \lg \Delta t$  法和  $\lg(P_w - P_a) - \Delta t$  法(式中:  $P_w$  为孔底压力;  $t$  为注入时间;  $\Delta t$  为停泵后起算的时间;  $P_a$  为孔底压力的渐进值)等三种方法能够给出较为合理的闭合压力值。对于  $P_w - \lg(t + \Delta t) / \Delta t$  法,曲线的线性关系明显,闭合压力点易于识别,通常取曲线拐点处的压力值为  $P_c$  值。本文利用  $P_w - \lg(t + \Delta t) / \Delta t$  法获取裂缝闭合压力  $P_c$ <sup>[4]</sup>。

## 2 地应力测试结果

### 2.1 测孔布置

为了测定隧道工程区的地应力状态,隧道设计部门布置了3个地应力测试钻孔,具体参数见表1。

表1 测试孔参数

Table 1 Parameters of measured drill holes

测试钻孔编号	位置	孔口高程 (m)	孔深 (m)	备注
JYZ2	隧道北端入口处	1928.936	192.2	
JYZ7	隧道的中部	2006.50	385.80	海拔最高处为2730m左右
JYZ8	隧道南端出口处	1835.8	240.6	

注:隧道标高为1605.8m。

### 2.2 典型压裂曲线

按设计部门的要求,结合隧道的地质钻探及钻孔岩心的完整情况,并根据工程需要,在3个钻孔中选取了31个测试段。在整个测试过程中,总体测试比较顺利,没有出现掉块、钻孔缩径等不良现象。在JYZ2、JYZ7和JYZ8钻孔中,分别成功进行了10、11和10段测试,6、7和6段印模。在测试过程中,记录到的典型压裂曲线见图1。

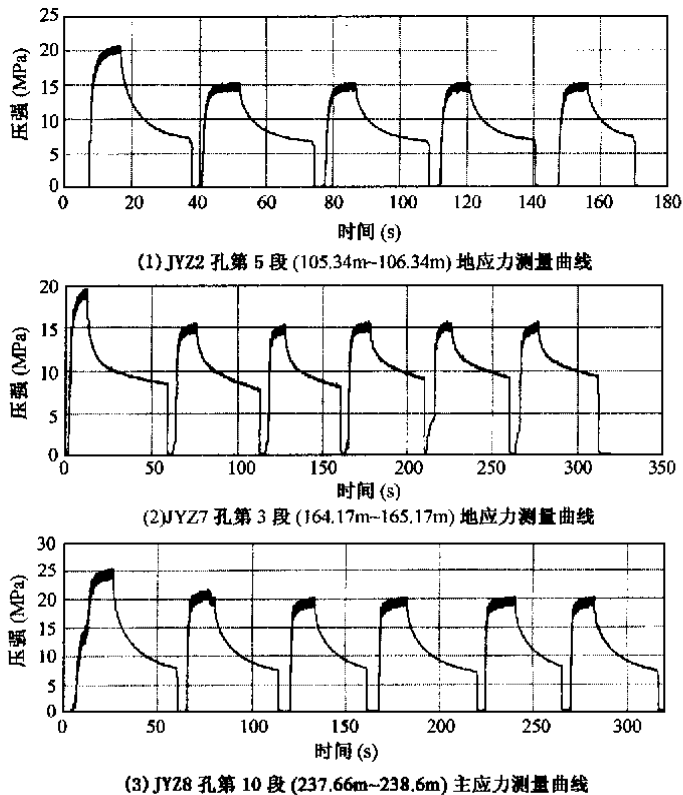


图1 典型的测量曲线

Fig.1 Typical measurement curves

从图1来看, 其压力记录曲线相当标准, 破裂压力峰值确切、明显, 各个循环重复测量的规律性很强, 测得的压裂参数具有良好的 consistency, 这是由于所测地段的岩层结构均匀, 岩石完整, 节理裂隙不发育, 完全符合地应力变化的一般规律, 因此较为可信地确定出了各测点的应力状态。

### 2.3 压裂参数

压裂参数及测试结果见表2。

表2 水压致裂原地应力测量结果

Table 2 In-situ measurements of ground stresses by hydraulic fracturing

孔号- 测段号	测段深度 (m)	压裂参数 (MPa)					主应力值 (MPa)			破裂方位 (°)
		$P_b$	$P_r$	$P_s$	$P_o$	T	$S_H$	$S_h$	$S_V$	
JYZ21	72.76 ~ 73.76	13.58	9.34	6.23	0.73	4.24	8.62	6.23	1.96	NW4.5°
JYZ22	84.26 ~ 85.26	18.62	14.30	8.50	0.84	4.32	10.36	8.50	2.28	NW19.5°
JYZ23	93.46 ~ 94.46	20.95	15.07	9.50	0.93	5.88	12.50	9.50	2.52	
JYZ24	96.26 ~ 97.26	19.05	15.22	9.20	0.96	3.83	11.42	9.20	2.60	
JYZ25	105.34 ~ 106.34	20.31	14.76	9.80	1.05	5.55	13.59	9.80	2.84	
JYZ26	137.16 ~ 138.16	21.70	16.38	10.30	1.37	5.32	13.15	10.30	3.70	NW14.5°
JYZ27	143.26 ~ 144.26	22.53	16.72	10.60	1.43	5.81	13.65	10.60	3.87	
JYZ28	152.18 ~ 153.18	16.30	13.70	9.10	1.52	2.60	12.08	9.10	4.11	NW9.5°
JYZ29	177.56 ~ 178.56	16.74	10.20	9.50	1.78	6.54	16.52	9.50	4.79	NW30.0°
JYZ210	189.00 ~ 190.00	22.05	17.50	12.20	1.83	4.55	17.27	12.20	4.95	NW10.5°
JYZ71	108.06 ~ 109.06	11.21	10.19	7.50	1.08	1.02	11.23	7.50	2.92	NW27.5°
JYZ72	138.66 ~ 139.66	13.94	11.61	9.80	1.39	2.33	16.40	9.80	3.74	NW21.5°
JYZ73	164.17 ~ 165.17	18.64	15.19	11.60	1.64	5.15	19.67	11.60	4.43	NW8.5°
JYZ74	192.76 ~ 193.76	15.66	11.71	9.20	1.93	3.95	13.96	9.20	5.20	
JYZ75	212.40 ~ 213.40	16.27	12.52	10.90	2.12	3.75	18.06	10.90	5.73	
JYZ76	221.36 ~ 222.36	12.42	9.99	7.30	2.21	2.43	9.70	7.30	5.98	NW45.0°
JYZ77	228.00 ~ 229.00	10.29	8.06	6.40	2.28	2.23	8.86	6.40	6.16	
JYZ78	255.46 ~ 256.46	15.66	12.31	9.10	2.55	3.35	12.44	9.10	6.90	NW39.5°
JYZ79	308.06 ~ 309.06	16.27	12.72	10.00	3.08	3.55	14.20	10.00	8.32	NW26.0°
JYZ710	347.16 ~ 348.16	19.31	15.26	12.20	3.47	4.05	17.87	12.20	9.37	
JYZ711	384.00 ~ 385.00	24.47	17.96	14.10	3.84	6.51	20.50	14.10	10.37	NW19.5°
JYZ81	60.67 ~ 61.67	19.17	14.84	8.70	0.61	4.33	10.65	8.70	1.64	NE10.5°
JYZ82	80.56 ~ 81.56	18.86	15.05	9.90	0.80	3.81	13.85	9.90	2.17	
JYZ83	100.64 ~ 101.64	20.24	15.90	11.50	1.01	4.34	17.59	11.50	2.72	NW2.0°
JYZ84	121.43 ~ 122.43	18.76	15.49	10.20	1.21	3.27	13.90	10.20	3.28	
JYZ85	141.06 ~ 142.06	20.45	16.33	11.60	1.41	4.12	17.06	11.60	3.81	
JYZ86	160.88 ~ 161.88	20.34	16.95	12.30	1.61	3.39	18.34	12.30	4.34	NE18.0°
JYZ87	181.45 ~ 182.45	21.40	16.75	12.50	1.81	4.65	18.94	12.50	4.90	NE12.0°
JYZ88	200.26 ~ 201.26	21.08	16.22	11.30	2.00	4.86	15.68	11.30	5.41	
JYZ89	227.67 ~ 228.67	21.92	17.59	12.30	2.28	4.33	17.03	12.30	6.15	NE25.0°
JYZ810	237.66 ~ 238.66	25.20	20.13	13.80	2.38	5.07	18.89	13.80	6.42	NE21.5°

注: 垂直应力 ( $S_v$ ) 根据上覆岩石的重量来计算, 计算中岩石容重取  $2.7g/cm^3$ 。

由表 2 可以看出:

JYZ2 钻孔, 第 8 和第 9 测段相对于邻近测段的测值偏小, 可能由于岩层不太完整, 测段内发育有原生裂隙或断层, 测试段压力明显降低, 因此破裂压力不太明显, 表现为原生裂隙的重张及扩展。

JYZ7 钻孔, 11 个测段应力测值起伏较大, 尤其是第 6 和第 7 测段测值突变, 显然受断层岩石破碎的影响。隧道洞身附近(孔底)岩石致密、坚硬、完整, 测量数据规律性较强。

JYZ8 钻孔, 第 3 测段的测值较高, 该段岩性为强度高的英安斑岩, 结构完整, 与上下岩石形成软硬差异, 应力偏大。与国内其他地区在火成岩中的数据比较, 地应力数值属于中等偏大。从获取的数据来看, 工程区地应力场主要以水平应力为主。

#### 2.4 地应力大小随深度的变化

对 JYZ2 孔、JYZ7 和 JYZ8 孔主应力测值进行的线性回归<sup>[5]</sup>, 结果如下:

JYZ2 孔:	$S_H = 7.50 + 0.0453D$	相关系数 $R^2: 0.7351$
	$S_h = 5.00 + 0.0330D$	相关系数 $R^2: 0.4926$
	$S_v = 0.0267D$	相关系数 $R^2: 0.9983$
JYZ7 孔:	$S_H = 10.5 + 0.021D$	相关系数 $R^2: 0.6581$
	$S_h = 7.30 + 0.012D$	相关系数 $R^2: 0.8339$
	$S_v = 0.027D$	相关系数 $R^2: 1.0000$
JYZ8 孔:	$S_H = 10.2 + 0.0355D$	相关系数 $R^2: 0.5602$
	$S_h = 7.80 + 0.0204D$	相关系数 $R^2: 0.7191$
	$S_v = 0.027D$	相关系数 $R^2: 1.0000$

式中: D——钻孔深度, 单位为 m; 主应力单位为 MPa。

JYZ2 孔、JYZ7 和 JYZ8 孔测点主应力值随深度的分布规律见图 2 (a)、(b) 和 (c)。

从图 2 可知, 3 个钻孔的水平主应力值总体上随深度加深而递增, 但少数局部的应力值有波动, 可能由于岩层不太完整, 测段内发育有原生裂隙或断层所致。总之, 工程区应力场的应力状态多数受岩性、地质构造形态的控制, 隧道出入口处应力场主要受水平应力和地形控制。

#### 2.5 地应力方向

由表 2 中的破裂方位一栏可见, 各个测试钻孔破裂缝方向的数据均比较一致, 各测试孔破裂缝方向如下:

- 1) JYZ2 孔破裂缝方向为:  $NW4.5^\circ \sim NW30.0^\circ$ , 平均  $S_H$  方向为  $NW14.8^\circ$ , 即 NNW 向;
- 2) JYZ7 孔破裂缝方向为:  $NW8.5^\circ \sim NW45.0^\circ$ , 平均  $S_H$  方向为  $NW26.8^\circ$ , 即 NNW 向;
- 3) JYZ8 孔破裂缝方向为:  $NE10.5^\circ \sim NE25.0^\circ$ , 平均  $S_H$  方向为  $NE14.2^\circ$  ( $NW2.0^\circ$  舍去), 即 NNE 向。

将各个测试钻孔的地应力方向绘入图 3 中。

由图 3 可见, 各个测试钻孔主应力方向测试结果基本上与区域震源机制解的主压应力方向一致。同时, 与新构造活动规律相符合, 从而可以说明测试数据的可靠性。

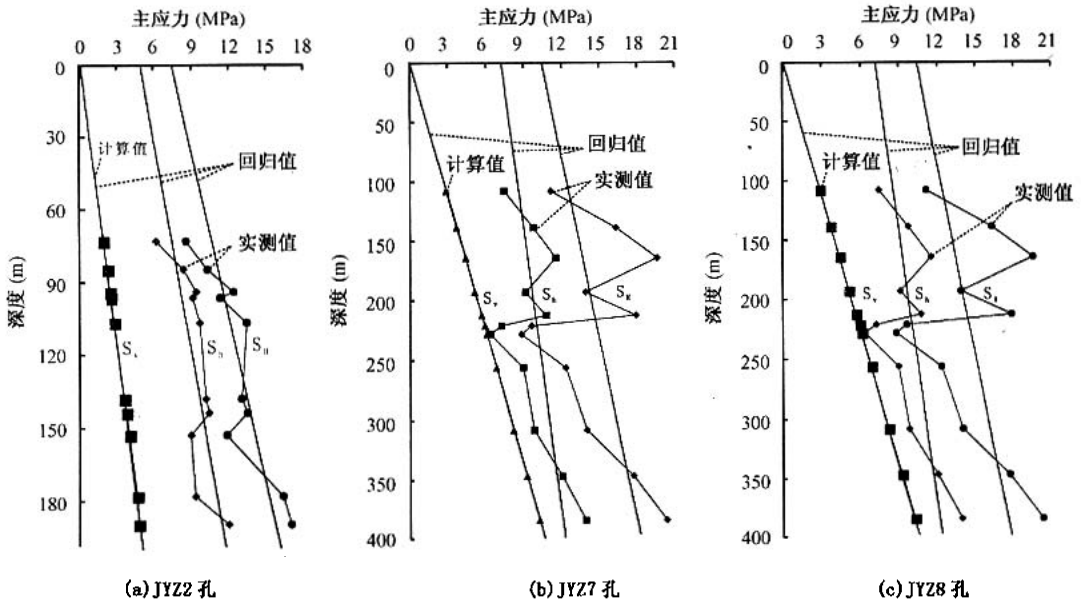


图 2 水平主应力值随深度变化图

Fig.2 Variations of horizontal principal stress values with depth

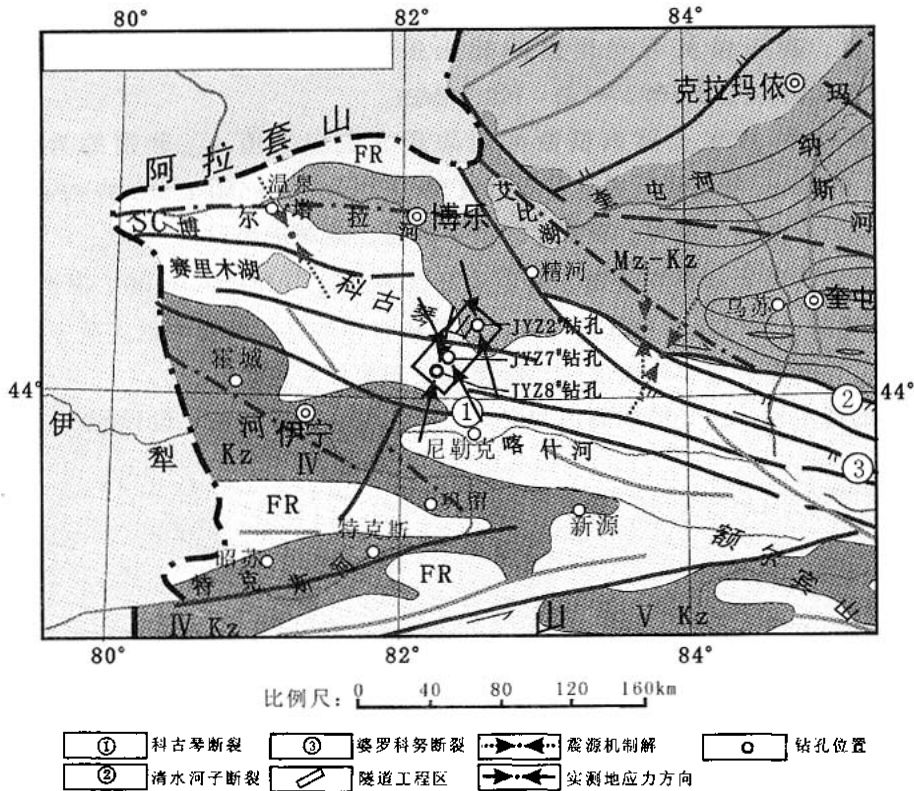


图 3 工程区地应力方向分布图

Fig.3 Distribution of directions of rock stress measurements in a tunnel by drill holes

### 3 隧道稳定性分析

#### 3.1 隧道轴线方向的选取

通常认为走向平行于最大主应力方向的隧道是较稳定的隧道<sup>[6]</sup>, 故尽量使得隧道方向靠近最大水平主应力方向, 是减少隧道变形破坏、提高稳定性的措施之一。但在实际情况中, 隧道方向的选择受到工程布局及地质条件的限制, 使隧道方向的选择有一定困难, 因此, 只能做一些局部的调整。

拟建隧道轴线方向为 NW43°, 与最大水平主应力平均方向的夹角分别为: JYZ2 孔 57.75°; JYZ7 孔 69.79°; JYZ8 孔 25.70°。仅从最大水平主应力与洞轴线夹角考虑, 地应力对隧道进口处及其中部的稳定性有不利影响, 对隧道出口处稳定性影响较小。

#### 3.2 隧道形状的讨论

根据 E. Hoek 理论<sup>[7]</sup>, 当开挖体形状能使得顶板处和侧帮处的压应力值基本相等时, 该开挖体形状, 就是该应力场下的最佳形状。能给出最均匀压应力分布的开挖体形状通常是炼环形或椭圆形的, 其长短轴之比等于原岩在硐室截面上的两个主应力之比。

以 JYZ7 测试孔为例, 顶板与侧帮原岩主应力之比 (取 384.00 ~ 385.00m) 为  $S_h/S_v = 1.90$ , 其最佳开挖形状为长轴水平、短轴直立, 两者之比为 1.90:1 的椭圆。

#### 3.3 岩爆发生的可能性

砾岩、灰岩、凝灰岩及英安斑岩的抗压强度  $R_c$  为: 87.17 ~ 90.36MPa、98.03 ~ 112.1MPa、89.70 ~ 104.11MPa 和 176.20 ~ 198.56MPa。

JYZ2 孔、JYZ7 和 JYZ8 孔隧洞横断面内的最大主应力值  $\sigma_{max}$  分别约为: 15.83MPa、19.74MPa 和 14.98MPa; 隧洞附近的垂直应力值  $S_v$  分别为: 4.95MPa、10.37MPa 和 6.42MPa。

隧道进出口岩石主要为灰岩、凝灰岩和英安斑岩, 隧洞进出口区  $R_c/\sigma_{max} = 5.99 \sim 13.25$ ; 隧道中部岩石主要为砾岩和英安斑岩, 隧洞中部区  $R_c/\sigma_{max} = 4.42 \sim 10.06$ 。根据《工程岩体分级标准》<sup>[8]</sup>, 隧洞进出口区属于低地应力区, 其成洞性较好; 隧洞中部区属于高地应力区, 其成洞性较差, 且开挖过程中可能出现岩爆和洞壁剥离掉块现象。

隧道围岩的稳定性, 还受横断面内的岩体的连续性、岩体结构、设计形状、开挖方式等因素的影响<sup>[9]</sup>。

## 4 结论

(1) 工程区应力场以水平主应力为主, 地应力值较高。地应力明显受岩石完整程度、地质构造和地形地貌的影响。

(2) 测试区最大水平主应力值一般为 8.62 ~ 20.50MPa, 最小水平主应力值一般为 6.23 ~ 14.10MPa。

(3) 实测最大水平主应力方向为 NW45.0° ~ NE25.0°, 平均为 NW9.10°。

(4) 由于最大水平主应力方向接近 SN 向, 拟建隧道方向为 NE 向, 二者的夹角为 52.10°。地应力方向对隧道稳定性具有一定的影响, 同时由于地应力值较高, 具备发生岩爆的地应力条件。

(5) 综合分析, 隧道进出口属于低地应力区, 中部属于高地应力区, 整个隧道的成洞性较差, 且开挖过程中可能出现岩爆和洞壁剥离掉块现象。尽管钻孔隧道部位具有发生岩爆的地应力条件, 但岩爆的发生与否还与岩石的力学性质、隧道形状等因素有关。因此, 上述结论可供施工设计时参考。

### 参 考 文 献

- [1] 蔡美峰. 地应力测量原理和技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. 45~46.
- [2] 王连捷, 丁原辰, 刘琦胜, 等. 引黄隧洞地应力测量 [J]. 地质力学学报, 1996, 2 (1): 62~64.
- [3] Ito T, Evans K, Kawai K, Hanyashi K. Hydraulic fracture reopening pressure and the estimation of maximum horizontal stress [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36 (6): 811~826.
- [4] Guo F, Morgenstern NR, Scott JD. Interpretation of hydraulic fracturing pressure: A comparison of eight methods used to identify shut-in pressure [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1993, 30 (6): 627~631.
- [5] 张启锐. 实用回归分析 [M]. 北京: 地质出版社, 1989. 16~44.
- [6] 中国地震局地壳应力研究所, 日本电力中央研究所. 水压致裂裂缝的形成和扩展研究 [M]. 北京: 地震出版社, 1999. 82.
- [7] E. Hoek. 和 E. T. Brown. 岩石地下工程 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986.
- [8] 国家标准编写组. 工程岩体分级标准 (GB50218-94) [S]. 北京: 中国计划出版社, 1994. 10~11.
- [9] 李金锁, 彭华, 崔巍, 等. 云南西北部铁路隧道地应力测试及工程应用 [J]. 地质力学学报, 2005, 11 (2): 140~143.

## APPLICATION OF HYDRAULIC FRACTURING IN-SITU STRESS MEASUREMENTS IN TUNNELLING IN WESTERN XINJIANG

MA Xiu-min, PENG Hua, LI Jin-suo

(Institute of Geo-mechanics, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Ground stress measurements and study in western China become more and more important with increasing construction investment in recent years. Hydraulic fracturing in-situ stress measurements were carried out in a working area of a mountain tunnel (with a maximum burial depth of 1100 m) in the North Tianshan Mountains along the proposed Jing-Yi-Huo Railway in western Xinjiang, and the values and directions of the principal stresses in the stress field in the North Tianshan region were obtained. According to the results of the stress measurements, the authors have studied the stress state in the stress field of the working area and analyzed the stability of the surrounding rocks of the tunnel and the possibility of the occurrence of geological hazards.

**Key words:** hydraulic fracturing; rock stress measurement; tunnel stability; geological hazard