

海洋. 瓜什则盆地的地应力场分析与模拟[J]. 华南地震, 2019, 39 (3): 101–108. [HAI Yang. Analysis and Simulation of In-situ Stress Field of Guashize Basin[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(3): 101–108]

## 瓜什则盆地的地应力场分析与模拟

海 洋

(中铁一院甘肃铁道综合工程勘察院有限公司, 兰州 730000)

**摘要:** 基于水压致裂法地应力测试的原理, 系统性研究分析了瓜什则盆地区域内的地应力场特征, 这为成宁铁路控制性工程甘青特长隧道的选线设计提供了重要的参考依据。首先, 根据区域内钻孔的地应力测试结果, 采用有限元方法进行了区域地应力场的三维数值模拟, 确定了该区域内的水平应力大于垂直应力的基本特征; 其次, 根据多个水平构造应力场的水平切片, 分析了水平构造应力场随深度的变化, 说明了该区域内水平构造应力场具有由东北向西南挤压的应力变化特征; 然后, 根据区域岩体抗拉强度分布, 发现该区域内存在一个低抗拉强度带, 它的地层结构相对较复杂, 且其工程地质特征主要表现为地层破碎带或断层; 最后, 采用最小二乘法拟合了 CK 方案隧道横截面最大切向应力与最大水平主应力的线性回归模型, 并预测了该方案隧道地层的岩爆发育程度。

**关键词:** 水压致裂法; 地应力场; 线性回归模型; 三维数值模拟; 抗拉强度

**中图分类号:** U452.11      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-8662(2019)03-0101-08

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2019.03.015

## Analysis and Simulation of In-situ Stress Field of Guashize Basin

HAI Yang

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd Gansu Railway Engineering Survey Institute Co. Ltd., Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Based on the principle of geostress measurement by hydraulic fracturing method, the characteristics of in-situ stress field of Guashize basin regions are systematically studied and analyzed. This provides an important reference for the selection of Chengning railway line. Firstly, the 3-D numerical simulation of the regional stress field is carried out based on the stress test results of the borehole in the region. The basic characteristics of in-situ stress field in this area are determined. Secondly, the change of the horizontal tectonic stress field with the depth is analyzed according to many horizontal slices of the horizontal tectonic stress field. The change shows that the horizontal tectonic stress field in the region is characterized by stress change from northeast to southwest. Then, according to the distribution of tensile strength of rock mass in the region, it is found that the region is in a low tensile strength zone, and its formation structure is relatively complex, and its geological characteristics are mainly characterized by formation breakage or fault. In the end, the least square

**收稿日期:** 2018-07-19

**作者简介:** 海洋(1984-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事地球物理勘探、地应力测量研究。

**E-mail:** hycugwh\_2005@163.com.

method is used to fit the linear regression model about the maximum tangential stress of the CK tunnel cross section and maximum horizontal principal stress, and the development of rockburst is predicted.

**Keywords:** Hydraulic fracturing method; In-situ stress field; Linear regression model; The 3-D numerical simulation; Tensile strength

## 0 引言

随着改革发展,中国在交通运输方面与发电方面都有着巨大的进步,尤其是近几年来,技术进一步提升,但是技术的施工水平还需要提升。但是,由于我国东西高差大、地势复杂,隧道工程已经成为铁路、公路、水利、市政等国家重大建设工程项目中不可缺少的一部分。我国大力发展高速铁路,列车运行速度的提高势必造成列车振动荷载进一步加大,从而对隧道结构的动力稳定性提出了更高的要求。地应力是地下工程变形和破坏的根本作用力,它的分布规律与岩土土质、大风侵蚀、温度变化、大气环境等因素有很多关系。

当工程在开挖施工时,又会诱发地应力状态的重新分布。因此,地应力的重要性日益显著<sup>[1]</sup>。

成宁铁路起于青海省西宁市,途经青海省海东市,黄南藏族自治州,甘南藏族自治州,四川省阿坝藏族羌族自治州,接轨于在建成兰铁路黄胜关站。其中,甘青特长隧道是全线控制性工程。该隧道穿越了青海和甘肃两省交界的瓜什则盆地地区,由于区内地质构造极其复杂,断裂、褶皱等构造发育,故对瓜什则盆地区域进行了详细的地应力场分析与模拟。

## 1 区域地理、地震及地质概况

### 1.1 区域地理概况

甘青特长隧道为西宁至成都铁路甘加至同仁段主越岭隧道,位于甘肃、青海两省交界处,进口位于甘肃省甘南州夏河县甘加乡仁艾村附近,出口位于青海省黄南州同仁县双朋西乡,隧道中部贯穿瓜什则盆地区域。该隧道的地貌属秦岭中高山区,地面高程 2700~3750 m,相对高差 200~600 m。整体呈南高北低的态势。区内沟谷深切,交合隆洼、阔合隆等宽谷分布,无大型河流发育,植被较为发育。瓜什则盆地的北面大都为“V”状的沟谷,雨季有积水,冬季无冰。其两侧具有一定的坡度,基岩出露面积大。大型沟谷内有多年流水,植被以草甸、灌木及针叶林为主。瓜什则

盆地的南面是缓坡,坡度比北面要小,基岩出露面积小,可以发现冰川痕迹,呈现“U”字型沟,现多为草原牧区。瓜什则盆地东高西低,盆地内水系较为发育,植被良好,以草甸为主,其地理位置如图 1 所示。

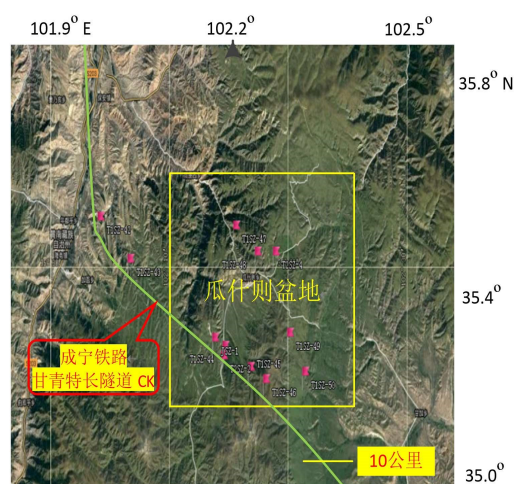


图 1 瓜什则盆地的地理位置与地应力测点

Fig.1 Geographical location and geostress measurement points of Guashize Basin

### 1.2 区域地震动参数特征

表征突发地震的强弱程度的参数主要有两个,分别为地震动峰值加速度和地震动加速度反应谱特征周期。地震动峰值加速度是指规范化地震动加速度反应谱最大值的水平加速度。地震动加速度反应谱特征周期是指规范化地震动加速度反应谱曲线下降点所对应的周期值。

根据中国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会颁布的《中国地震动参数区划图》GB18306-2015 附录 A 中的图 A.1 和附录 B 中的图 B.1,瓜什则盆地区域在 II 类场地条件下的地震动峰值加速度为 0.15 g,其地震动加速度反应谱特征周期为 0.40 s,如图 2 所示。这说明瓜什则盆地区域突发地震的地震烈度为七度,其属于破坏性地震。因此,甘青特长隧道的选线方案尤为重要。

### 1.3 区域地质概况

根据地质调查及钻孔资料揭示,瓜什则盆地的地层主要包含了第四系风积黄土,第三系泥岩、

砂岩、砾岩，三叠系板岩、砂岩，燕山期闪长岩等，具体参见表 1。

调查结果发现，瓜什则盆地区域内包含 5 个区域性断裂，它们均为东北走向，且主要地层岩性为三叠系板岩和砂岩。

2 水压致裂法地应力测试原理

水压致裂法地应力测试是从为增加油井产量的射井方法移植发展而来的岩体应力测试方法<sup>[2]</sup>。该方法是 2003 年国际岩石力学学会试验方法委员会颁布的确定岩体应力建议方法中所推荐的方法之一，是目前国际上能较好地直接进行深孔地应力测量的先进方法。该方法无需知道岩体的力学参数就可获得地层中现今地应力的多种参量，并具有操作简便、可在任意深度进行连续或重复测试、测量速度快、测值稳定可靠等特点，因此近年来发展很快，并取得了大量的成果<sup>[3]</sup>。

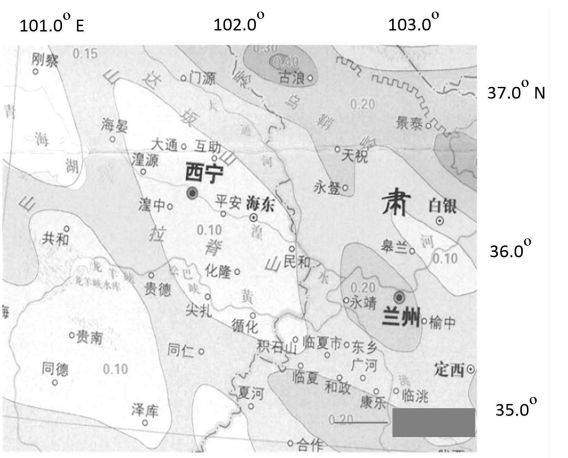
水压致裂法地应力测量是以弹性力学为基础，且以下列三个假设条件为前提<sup>[4]</sup>：

- (1)岩石是线性、均匀和各向同性的弹性体。
- (2)岩石是完整的，压裂液体对岩石来说是非渗透的。
- (3)岩层中有一个主应力是垂直的，其大小等于上覆岩层的压力，其他两个主应力均是水平的。

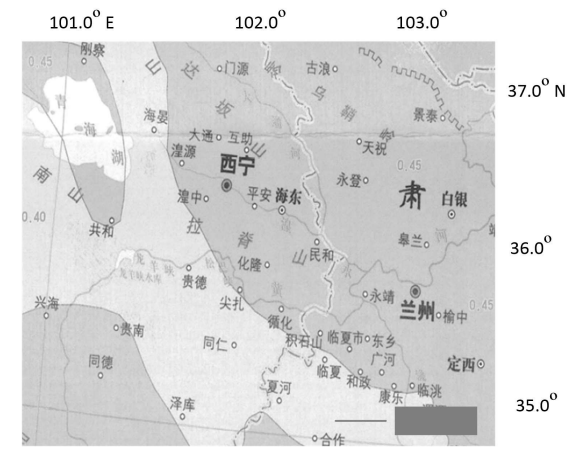
采用图 3 所示的水压致裂系统将钻孔某段封闭起来，进行钻孔内的岩石压裂试验。与此同时，用数据采集系统实时记录试验段压力随时间变化的压力记录曲线。对压力记录曲线进行数据分析，确定压裂参数。根据相关计算公式，确定测试深度范围内地层的最大水平主应力、最小水平主应力，以及岩体抗拉强度<sup>[5]</sup>。其岩石压裂试验的过程具体如下：

首先，向试验段(常称压裂段)注入高压水。当水压达到破裂压力  $P_b$  时，岩石产生裂缝。此时，试验段的压力将急剧下降，最终保持恒定以维持裂缝张开；其次，当关闭压力泵后，由于地应力场的作用，裂缝处于临界闭合状态，即水压达到瞬时闭合压力  $P_s$ ；接着，当试验段的压力没有明显下降时，解除试验段的压力，使已张开的裂缝逐渐闭合。此时，完成一次压裂循环；然后，当完全卸压之后，再对试验段重新加压，使裂缝重新张开，其对应的压力称为重张压力  $P_r$ 。重复上述过程，完成 4~5 次压裂循环；最后，采用定向印模器记录裂缝的长度和方向<sup>[6]</sup>。

当压力传感器在钻孔内时，钻孔试验段的最大水平主应力  $\sigma_H$ 、最小水平主应力  $\sigma_h$ 、垂直主应



(a)地震动峰值加速度



(b)地震动加速度反应谱特征周期

图 2 瓜什则盆地的区域地震动参数分布图

Fig. 2 Distribution map of regional ground motion parameters in Guashize Basin

表 1 瓜什则盆地区域内的主要地层岩性

Table 1 Main stratigraphic lithologies in the guashize basin area

序号	地质时代	主要岩性
1	第四系 (Q)	砂质黄土、粉土、角砾、碎石土等
2	新近系 (N)	砂岩、砾岩、泥岩
3	三叠系 (T3)	板岩、变质砂岩、断层角砾、断层泥、侵入岩
4	燕山期 (δ5)	闪长岩

甘青特长隧道的地质构造隶属于秦岭地槽褶皱系的临潭—天水褶皱带，总体呈东西—北西向南凸的弧形伸展，三级构造单元属美武新寺—大草滩复背斜。受多其次构造运动影响强烈，断裂构造发育，次生褶皱构造极为发育。根据地质

力  $\sigma_v$ ，以及岩体抗拉强度  $T$  的计算公式如下：

$$\sigma_H = 3P_s - P_r - P_0 \quad (1)$$

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

$$\sigma_v = \rho g H \quad (3)$$

$$T = P_b - P_r \quad (4)$$

式中： $P_b$  为破裂压力， $P_s$  为瞬时闭合压力， $P_r$  为重张压力， $P_0$  为试验段的孔隙水压力； $\rho$  为上覆岩体密度， $g$  为重力加速度， $H$  为测点深度。

当压力传感器在地面时，由于采用钻杆传送压力，相对管路直径较大，未计管路压力损失。故上述计算公式需要用以下公式进行修正，即：

$$P_b' = P_b + P_w \quad (5)$$

$$P_s' = P_s + P_w \quad (6)$$

$$P_r' = P_r + P_w \quad (7)$$

式中： $P_b'$  为压力记录曲线上的破裂压力， $P_s'$  为压力记录曲线上的瞬时闭合压力， $P_r'$  为压力记录曲线上的重开压力， $P_w$  为钻杆内的水柱压力。

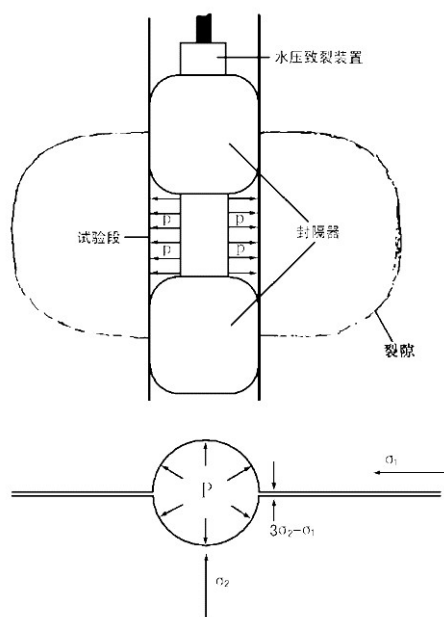


图3 水压致裂法地应力测量原理

Fig.3 Principle of geostress measurement by hydraulic fracturing method

### 3 地应力测试结果

为研究瓜什则盆地的区域地应力场特征，本文选取了该测区内的 12 个钻孔，结合它们的地质条件、岩芯 RQD、测井数据，以及岩样试验结果等资料，对这些钻孔进行了水压致裂法地应力测试。首先，通过现场测试获取钻孔各个测段的压力记录曲线；其次，根据压力记录曲线确定压裂参数(包含破裂压力  $P_b$ 、裂缝重张压力  $P_r$ 、水压致

裂面的瞬时闭合压力  $P_s$ 、测段处钻杆内水柱压力  $P_w$ ，以及岩层的孔隙水压力  $P_0$ )；然后，根据压裂参数及相关计算公式，确定各个测段岩体的原位抗拉强度  $T$ 、最大水平主应力  $\sigma_H$ 、最小水平主应力  $\sigma_h$ ，以及垂直主应力  $\sigma_v$ ；最后，通过印模测量获取最大水平主应力的方向。记录 T1SZ-43 钻孔 288.20 m、332.70 m、345.80 m、376.90 m 和 399.00 m 等 5 个测段的压力曲线如图 4(a)~(e)所示。根据压力记录曲线的形态，选择了 399.00 m 测段进行最大水平主应力方向的印模测量，其测试结果如图 5 所示。根据裂缝方向的测量结果，确定该钻孔的最大水平主应力方向为 N70°E。

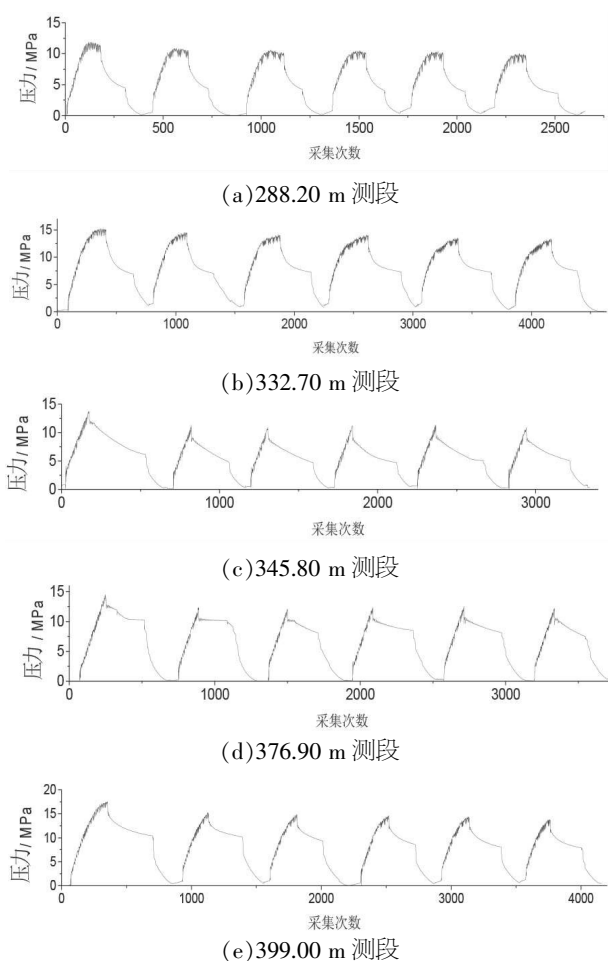


图4 T1SZ-43 钻孔压力记录曲线

Fig.4 Pressure recording curve in T1SZ-43 borehole

### 4 地应力场分析与模拟

#### 4.1 三维地应力场的数值模拟

根据瓜什则盆地区域内 12 个钻孔的地应力测试结果分析，各主应力的测量值均随深度的增加而呈上升变化趋势。故采用最小二乘法对测区内

各个钻孔的主应力测量值进行线性回归,建立其主应力随深度变化的线性回归模型。例如,T1SZ-43 钻孔最大水平主应力、最小水平主应力,以及垂直主应力随深度的变化关系如图 6 所示。该钻孔的线性回归模型计算公式如下:

$$\sigma_H = 0.0832H - 9.4856 (R=0.9785) \quad (8)$$

$$\sigma_h = 0.0445H - 2.4819 (R=0.9890) \quad (9)$$

$$\sigma_v = 0.0256H \quad (10)$$

式中:  $\sigma_H$  为最大水平主应力,  $\sigma_h$  为最小水平主应力,  $\sigma_v$  为垂直主应力,  $H$  为钻孔深度。

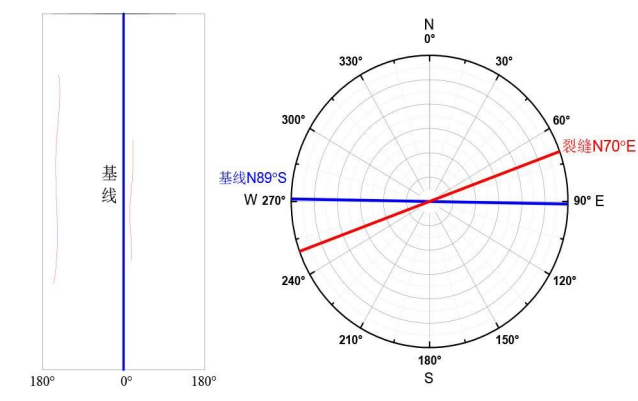


图5 T1SZ-43 钻孔印模

Fig.5 Printer shape in T1SZ-43 borehole

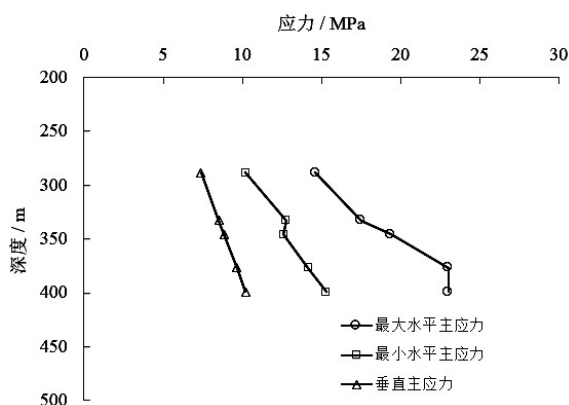
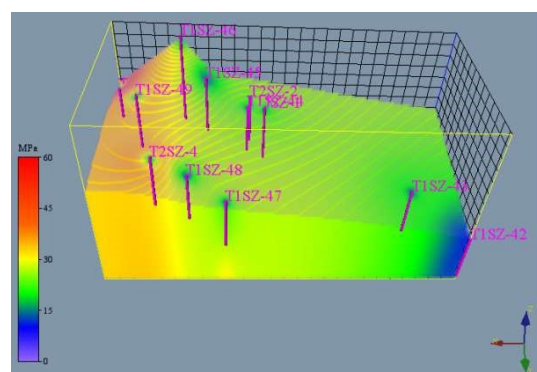


图6 T1SZ-43 钻孔三个主应力随深度变化的曲线

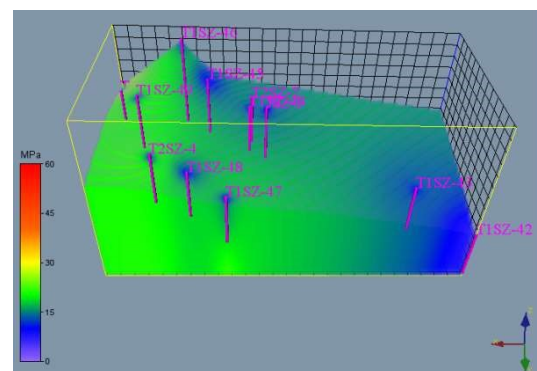
Fig.6 Curves of the change of three principal stresses with depth in T1SZ-43 borehole

对工程区域内钻孔的地应力测试仅仅有助于对该区域地质构造情况的初步认识,但是,对较为复杂的地质构造区域,单纯的钻孔地应力测试结果就显得过于单一,需要对该区域的地应力场进行全面的分析。根据瓜什则盆地各个钻孔的主应力线性回归模型,采用三维有限元数值模拟,其该区域的最大水平主应力场、最小水平主应力场,以及垂直主应力场的三维模型分别如图 7(a)~

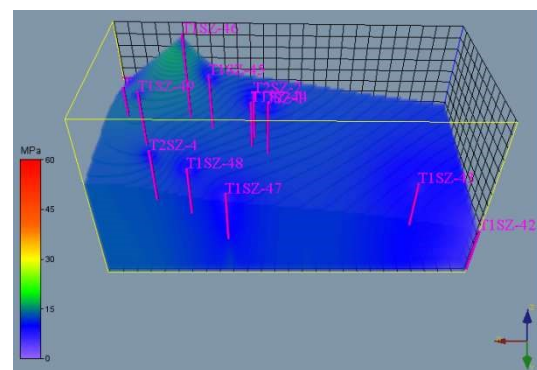
(c)所示。从三维模型数值模拟的结果可以明显发现,该测区内三个主应力的关系是  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ , 它反映了较强的现今水平构造应力作用的特点。



(a)最大水平主应力场



(b)最小水平主应力场



(c)垂直主应力场

图7 瓜什则盆地的三维地应力场模拟

Fig.7 The 3-D numerical simulation of in-situ stress field of Guashize basin

## 4.2 水平构造应力场随深度变化的特征

根据瓜什则盆地的三维地应力场模型,基本确定该区域的水平构造应力场决定了该区域的地应力场的变化特征。对最大水平主应力场和最小水平主应力场两个三维模型分别选取由浅入深的高程 2900 m、2700 m、2500 m 最大水平主应力与最小水平主应力场水平切片,如图 8(a)~(f)所示。从地应力场的变化可以看出,该区域的最大水平



主应力呈现随深度的增加由东向西挤压的应力变化特征,最小水平主应力则随深度增加呈现由北向南挤压的应力变化特征。故该区域的水平构造应力场整体表现为由东北向西南挤压的应力变化特征。这一点与上述地应力测试中印模测量的破裂面方向基本一致。在铁路选线设计过程中,线路轴线方向应与该区域的水平构造应力场方向呈小角度的相交,以此保证隧道工程的稳定性及施工的安全性。

### 4.3 岩体抗拉强度与地层的变化关系

岩石抗拉强度是岩石试件在单轴拉力作用下抵抗破坏的极限能力,或极限强度,它在数值上等于破坏时的最大拉应力<sup>[7]</sup>。大量的地应力测试结果表明,初次的破裂循环与其后的重张循环有显著差别,一般情况下,破裂压力 $P_b$ 大于重张压力 $P_r$ 。初次的破裂循环不仅要克服岩体所承受的压应力,而且还要克服岩体本身的抗拉强度 $T$ 。而在破裂后的重张循环中,由于破裂面已经形成,要使

之重新张开,只需克服作用在破裂面上的地应力,二者之差就是岩体原位抗拉强度。因此,在水平地质构造应力场内,岩体抗拉强度就是岩石能够承受最大水平主应力 $\sigma_H$ 的极限能力。

根据瓜什则盆地各个钻孔的地应力测试结果,确定区域内原位岩体平均抗拉强度分布如图9所示。从图中可以明显看出,该区域内存在一个相对较低的抗拉强度带(图中红色带状区域)。结合钻孔揭示的地层信息,在该带两侧,高程在2500~3000 m范围内的地层主要表现为三叠系板岩,燕山期闪长岩,而该带之内,其地层变化较复杂,主要包含第三系砂岩、砾岩,三叠系砂岩、板岩,燕山期闪长岩。另外,在该带内,T1SZ-48钻孔的地层又揭示了该区域内存在断层的迹象。故推断这个低抗拉强度带应该是区域内水平构造运动的结果,即该带主要表现为地层破碎带或断层。瓜什则盆地区域内钻孔揭示的地层信息具体如表2所示。在线路设计时,隧道走向应尽可能绕过该低抗拉强度带。

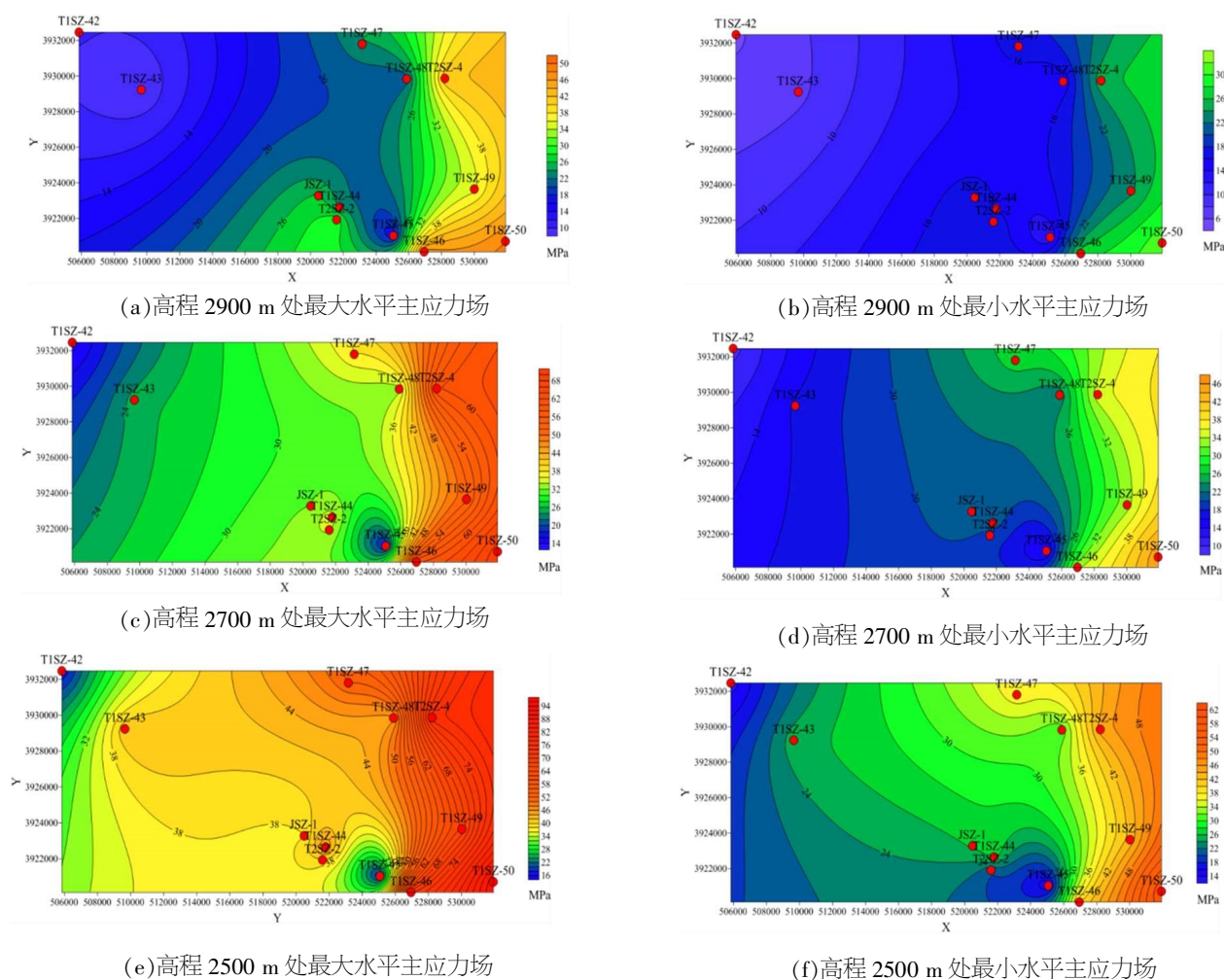


图8 水平构造应力场切片图

Fig.8 Slices of horizontal tectonic stress field

4.4 区域岩爆预测分析

理论及实践证明,在水平应力大于垂直应力的情况下,最大水平主应力方向与隧道轴线的夹角越小越有利于洞室的稳定性。而最大主应力方向与隧道轴线呈 90°夹角时,隧道横截面上受到切向应力最大,对洞径围岩剪切破坏性越大。

在高应力区域内,开挖地下洞室往往会产生岩爆现象。由于岩体处于地应力的作用下,洞室开挖过程中爆破使洞室周围岩石应力状态发生急剧变化,岩体中的弹性应变能突然释放,产生局部过渡变形状态,即改变初始应力状态。如果地应力超过岩石原有的极限强度就会使得应力释放,便会产生岩爆<sup>[8]</sup>。

(1) Russenes 岩爆判别准则<sup>[9-10]</sup>

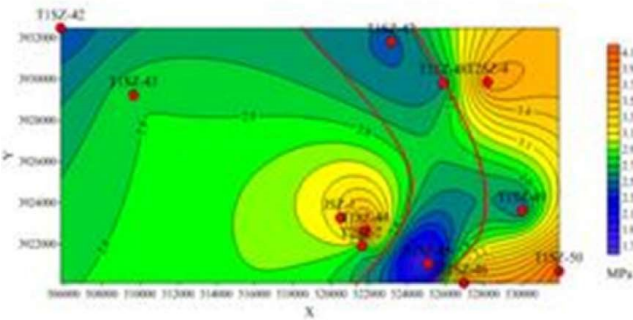


图 9 瓜什则盆地的区域岩体平均抗拉强度分布图  
Fig.9 Distribution of average tensile strength of rock mass in Guashize basin

令  $K=\frac{\sigma_{\theta_{max}}}{R_c}$ ,  $\sigma_{\theta_{max}}$  为隧道轴线横截面上的最大切向应力,  $R_c$  为岩石单轴饱和抗压强度,则:

- (a)当  $K<0.2$  时,无岩爆;
- (b)当  $0.2\leq K<0.3$  时,轻微岩爆;
- (c)当  $0.3\leq K<0.55$  时,中等岩爆;
- (d)当  $K\geq 0.55$  时,强烈岩爆。

(2)隧道横截面最大切向应力的计算

根据弹性力学及水压致裂法应力测量原理,由三个主应力及最大水平主应力与隧道轴线的夹角,计算隧道洞室横截面上切向应力的最大值。具体计算公式如下<sup>[15-6,8-11]</sup>:

$$\sigma_{横}=\frac{\sigma_H+\sigma_h}{2}-\frac{\sigma_H-\sigma_h}{2}\cos2\theta$$
 (11)

$$\sigma_{纵}=\frac{\sigma_H+\sigma_h}{2}+\frac{\sigma_H-\sigma_h}{2}\cos2\theta$$
 (12)

$$\tau=\frac{\sigma_H-\sigma_h}{2}\sin2\theta$$
 (13)

$$\sigma_{\theta_{max}}\begin{cases} 3\sigma_{横}-\sigma_v(\sigma_{横}\geq\sigma_v) \\ 3\sigma_v-\sigma_{横}(\sigma_{横}<\sigma_v) \end{cases} \quad (14)$$

以上公式中:  $\sigma_H$  为最大水平主应力,  $\sigma_h$  为最小水平主应力,  $\sigma_{横}$  为与隧道轴线方向垂直的水平应力(隧道侧向应力),  $\sigma_{纵}$  为与隧道轴线方向平行的水平应力(隧道轴向应力),  $\tau$  为剪切应力,  $\theta$  为最大水平主应力与隧道轴向的夹角( $\theta\leq 90^\circ$ ),  $\sigma_{\theta_{max}}$  为隧道轴线横截面上的最大切向应力。

根据上述计算公式可以看出,隧道横截面最大切向应力的计算过程相对较复杂。然而,经过大量的数理统计发现,隧道横截面最大切向应力  $\sigma_{\theta_{max}}$  与最大水平主应力  $\sigma_H$  存在一定的线性关系,即:

$$\sigma_{\theta_{max}}=A\sigma_H+B$$
 (15)

式中, A 和 B 均为回归系数(常数)。

因此,根据区域内的最大水平主应力,采用线性回归拟合的方法,可以高效率的计算出隧道

表 2 高程在 2500~3000 m 范围内各个钻孔揭示的地层岩性  
Table 2 Stratigraphic lithology revealed by boreholes in the range of 2500~3000 m

钻孔编号	主要地层岩性	其他地层岩性
JSZ-1	板岩(T)	角砾岩(N)、砾岩(N)、砂岩(N)
T1SZ-42	安山岩(T)	泥岩(N)、板岩(T)
T1SZ-43	闪长岩(δ5)	-
T1SZ-44	砾岩夹砂岩(N)	砂岩(T)
T1SZ-45	砂岩(T)	大理岩(T)、板岩(T)
T1SZ-46	闪长岩(δ5)	板岩(T)
T1SZ-47	板岩(T)	闪长岩(δ5)、砂岩(T)
T1SZ-48	砾岩(N)	断层角砾(T)、板岩(T)、大理岩(T)、泥岩(N)、砂岩(T)、闪长岩(δ5)
T1SZ-49	板岩(T)	-
T1SZ-50	闪长岩(δ5)	泥岩(N)、砾岩(N)
T2SZ-2	板岩(T)	砂岩(N)、砾岩(N)
T2SZ-4	板岩(T)	砂岩(N)、砾岩(N)

轴线横截面上的最大切向应力。

(3)CK 方案隧道的岩爆预测实例

根据瓜什则盆地的三维地应力场模型,选取经过 T1SZ -42、T1SZ -43、JSZ -1、T1SZ -44、T2SZ-2、T1SZ-45,以及 T1SZ-46 等 7 个钻孔的 CK 方案隧道线路,该隧道轴向大约 150°。采用线

性最小二乘拟合, 确定了该方案隧道横截面最大切向应力与最大水平主应力的线性回归模型, 如图 10 所示, 其计算公式如下:

$$\sigma_{\theta_{\max}} = 2.7618\sigma_H - 6.7878 (R^2 = 0.9862) \quad (16)$$

通过上述公式, 可以计算出 CK 方案隧道横截面的最大切向应力剖面, 如图 11 所示。

选取各个钻孔岩样测试的单轴饱和抗压强度, 利用(16)式计算隧道横截面的最大切向应力, 并根据 Russenes 判据, 推测 CK 方案隧道的多数三叠系地层岩石存在中等岩爆, 且高程在 2500~2800 m 范围内的三叠系地层岩石还局部存在强烈岩爆。

## 5 结语

采用水压致裂法对瓜什则盆区域内的钻孔进行了地应力测试, 并根据测试结果对该区域的地应力场进行了分析和模拟, 得出以下结论:

(1)根据各个钻孔的地应力测试结果, 建立了三个主应力随深度变化的线性回归模型, 并采用有限元三维数值模拟, 对瓜什则盆区域内三个主应力场进行了直观的模拟。从模拟结果可以明

显看出, 该测区内三个主应力的关系是  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ , 即水平应力大于垂直应力。

(2)在瓜什则盆区域内, 最大水平主应力随深度的增加呈现由东向西挤压的应力变化特征, 最小水平主应力则随深度增加呈现由北向南挤压的应力变化特征。从整体来看, 该区域的水平构造应力场整体表现为由东北向西南挤压的应力变化特征。

(3)在瓜什则盆区域内, 存在一个低抗拉强度带, 它是区域内水平构造运动的结果。在该带内, 地层结构相对较复杂, 且它的工程地质特征主要表现为地层破碎带或断层。

(4)采用最小二乘法, 确定隧道横截面最大切向应力与最大主应力的线性回归模型。同时, 根据 Russenes 判据, 并结合岩石试验数据, 可以快速预测瓜什则盆区域内地层的岩爆发育程度。

## 参考文献:

- [1] 孟楠楠.地应力测量方法及研究[D].包头:内蒙古科技大学,2015.
- [2] 王建军.应用水压致裂法测量三维地应力的几个问题[J].岩石力学与工程学报,2000,19(2):229-233.
- [3] 张雄锋.水压致裂法在隧道地应力测试中的应用[J].铁道勘察,2011(1):49-53.
- [4] 韩金良,吴树仁,谭成轩,等.东秦岭东江口花岗岩体水压致裂法与 AE 法地应力测量对比研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(1):81-86.
- [5] 李建伟,刘广英,李翔.燕山山脉某隧道地应力特征及岩爆预测与防治[J].铁道勘察,2015(3):18-22.
- [6] 刘军强,施建仁,王水晶,等.地应力测量在深埋长大隧道岩爆预测中的应用[J].地下空间与工程学报,2011,7(4):776-780.
- [7] 徐志英.岩石力学[M].北京:水利电力出版社,1993.
- [8] 李瑞峰.克什克腾越岭隧道区地应力特征分析[J].铁道工程学报,2011(6):52-56.
- [9] 汪波,何川,吴德兴,等.基于岩破坏形迹修正隧道区地应力及岩爆预测的研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(4):811-817.
- [10] 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):4472-4477.
- [11] 谷兆祺,彭守拙,李仲奎.地下洞室工程[M].北京:清华大学出版社,1993.
- [12] 杨姗姗,邵瑞华,陈力,等.成型载铁泥质活性炭的最佳成型条件[J].西安工程大学学报,2018,32(3):279-284.

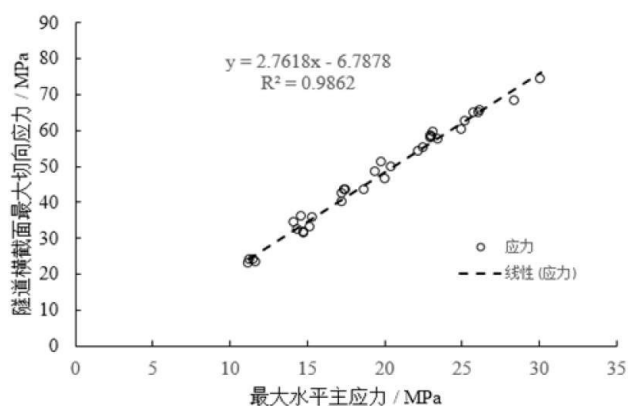


图 10 CK 方案隧道横截面最大切向应力与最大水平主应力交会图

Fig.10 Cross section about the maximum tangential stress of CK tunnel cross section and the maximum horizontal principal stress

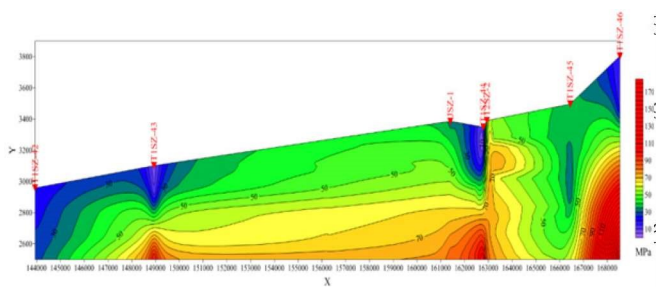


图 11 CK 方案隧道横截面最大切向应力剖面

Fig.11 The maximum tangential stress section of CK tunnel cross section