

秦岭北缘某深埋引水隧洞应力场特征研究*

张新辉¹,焦萱²,王瑞芳³,尹健民¹,汪洋¹

(1. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室,武汉 430010; 2. 华北水利水电大学 水利学院,郑州 450040;3. 郑州测绘学校,郑州 450015)

摘 要:岩体初始地应力场是研究地下洞室围岩稳定状况和隧洞选线的重要依据。应用水压致裂法对秦岭北缘某深埋引水隧洞应力进行测定,结果显示隧洞围岩应力等级属于中低~高应力水平,应力量值呈 $\sigma_H>\sigma_h>\sigma_z$ 特征,最大水平主应力方向为近NE向,与区域构造主压应力方位接近一致。基于实测数据,对工程区应力场进行回归反演,并结合区域构造应力对隧道沿线的深埋和浅埋段应力场分布规律进行了研究,以期对引水工程的设计和施工提供参考。

关键词: 水压致裂法; 实测应力; 构造应力; 回归反演; 最大水平主应力

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2017)02-0410-06

Study on Stress Field Characteristics of A Deep Buried Diversion Tunnel in the Northern Margin of Qinling

Zhang Xinhui¹, Jiao Xuan², Wang Ruifang³, Yin Jianmin¹, Wang Yang¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, P.R. China; 2. Institute of water conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450040, P.R. China; 3. Zhengzhou School for Surveying and Mapping, Zhengzhou 450015, P.R. China)

Abstract: The initial stress field of rock mass is an important basis for studying the stability of surrounding rock of underground caverns and selecting tunnel line. In-situ stress was tested by hydraulic fracturing method in a deep buried diversion tunnel in the northern margin of Qinling. The results show that the stress level of the surrounding rock of tunnel belongs to middle lower ~ high stress level, the feature of stress value should be $\sigma_H>\sigma_h>\sigma_z$, and the maximum horizontal principal stress direction is NE and in close agreement with regional tectonic principal pressure. Based on the measured data, regression inversion was conducted in the stress field of project area. Combined with regional tectonic stress, the stress field distribution was studied in deep buried and shallow buried section along the tunnel in order to provide a reference for the design and construction of water diversion project.

Keywords: hydraulic fracturing method; measured stress; tectonic stress; regression inversion; the maximum horizontal principal stress

0 引言

岩体初始地应力场是受多因素相互作用影响

的复杂系统,岩体应力状态的确定是工程岩体力学的一个重要问题^[1]。初始地应力场的分析是研究大坝开挖建基面确定、坝基坝肩岩体稳定分析、地

* 收稿日期:2016-07-14(修改稿)
作者简介:张新辉(1988-),男,陕西渭南人,硕士,主要从事岩石力学与工程方面研究。E-mail:547834903@qq.com
基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401801);国家自然科学基金(51204025);中央级公益性科研院所基金(CKSF2013033,CKSF2014064YT,CKSF2015040/YT)

下洞室围岩稳定状况、高边坡岩体稳定情况、隧洞选线以及水库诱发地震^[2-4]等方面的重要依据。

1987年,国际岩石力学学会测试方法委员会颁布了“测定岩石应力的建议方法”,推荐包括USBM型钻孔孔径变形测量法、CSIR(CSIRO)型钻孔孔壁应变测量法、水压致裂测量法和岩体表面应力的应力恢复测量法等多种地应力测试方法^[5]。水压致裂法为本次地应力测试所采用方法,经过几十年理论和实验研究,目前该方法已成为能较好地直接进行深部地壳应力测量的实用有效的方法,其无需知道岩石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、测值可靠等优点^[6]。

实测应力方法是获得岩体应力场最直接的途径,但由于场地和经费等原因,不可能进行大量的测试。因此,为了更好地满足工程设计和施工需要,可根据实测应力资料,结合地质构造条件,通过有效的分析方法,进行初始地应力场的反演计算,以获得更为精确的、适用范围更广的地应力场^[7]。

为查明秦岭北缘某引水工程一段深埋引水隧洞围岩应力状态及变形特性,笔者基于该段引水线路两个典型测点的应力测试,对工程区隧洞的地应力场特征进行回归反演及评价。

1 区域地质背景

引水工程位于渭河盆地南缘及秦岭北坡,地势总体南高北低,跨越的地貌单元主要有秦岭中低山、山前洪积扇(裙)、山前洪积平原,山前丘陵、河谷阶地等5个地貌类型。

大地构造单元位于华北准地台(I)内的汾渭断陷盆地(I2)及秦岭褶皱系(II)内的南秦岭褶皱系(II2),两个大地构造单元以秦岭山前活动断裂带为界(区域大地构造划分如图1)。构造形迹复杂,断裂十分发育,至今仍有活动迹象。

依据陕西省地震志^[8](宋立胜),渭河盆地及邻区的小震震源机制解和小震综合震源机制解表明,该区域压应力主轴的优势方位为NNE向,张应力主轴为NWW向,姜家兰^[9],王卫东^[10]的研究成果与之一致;渭河盆地钻孔应力测量结果也表明,该区平面应力场最大主压应力方位为NNE向^[11];而利用断层滑动资料反演所得结果也显示出,该区域构造主张应力方向为北东向、主压应力方向为北东向^[12]。因此,上述研究均反映出渭河盆地在NWW-SEE向拉张、NNE-SSW向挤压的应力场作用下的地球动力学背景。

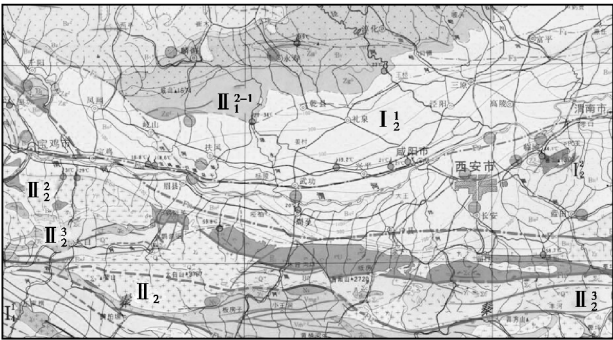


图1 区域地质构造图

Fig. 1 Regional geological structure map

2 深埋隧洞实测应力场特征研究

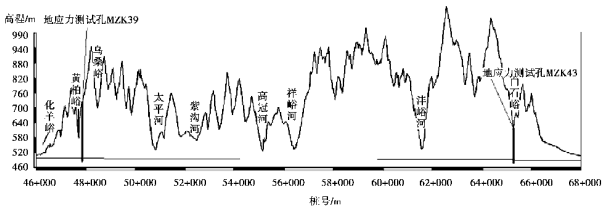
2.1 工程区概况

该段引水隧洞南部为秦岭,北部为渭河盆地,跨越的地貌单元主要有秦岭中低山、山前洪积扇、山前洪积平原,山前丘陵、河谷阶地等5个地貌类型。地层主要由前震旦系宽坪群变质岩、燕山期花岗岩及第四系松散堆积层组成。受秦岭山前活动断裂带及陇县~岐山~埡柏活动断裂带影响,工程区一系列小规模次级断层走向主要以东西走向为主。本次测试段隧洞设计桩号为45+890~68+490 m,全长22 600 m,为无压隧洞,洞室围岩最大埋置深度达595 m。

本文测试方法为水压致裂法,分别在MZK39孔和MZK43孔中进行测试,隧洞线路与测孔位置如图2所示。



(a)平面图



(b)剖面图

图2 隧洞路线与测孔布置图

Fig. 2 Tunnel route and layout of measuring holes

2.2 测试原理

水压致裂法^[6]主要是利用一对可加压膨胀的橡胶封隔器,在预定的测试深度封隔一段岩体完整的钻孔,然后通过水泵对封隔段加压,直至压裂,根据压裂曲线的压力特征值计算钻孔横断面的最大、最小主应力值。若钻孔处于铅直方向,则计算结果即为最大、最小水平主应力。一般情况下,裂缝沿钻孔横截面的最大主应力方向起裂与扩展,裂缝所在方向即为钻孔横截面最大主应力的方向,可由印模器确定。钻孔垂直时,则最大、最小水平主应力如下式所示:

$$\sigma_H = 3P_s - P_r - P_0 \tag{1}$$

$$\sigma_h = P_s \tag{2}$$

式中: σ_H 为最大水平主应力; σ_h 为最小水平主应力; P_s 为维持裂隙张开的瞬时关闭压力; P_r 为裂缝重张压力; P_0 为孔隙水压力。

2.3 测试结果分析

在该段隧洞 MZK39 和 MZK43 孔中,依据隧洞围岩应力测试的深度要求和钻孔中完整岩芯分布深度情况,选择了水压致裂法的测段深度。测试结果如图 3 所示。

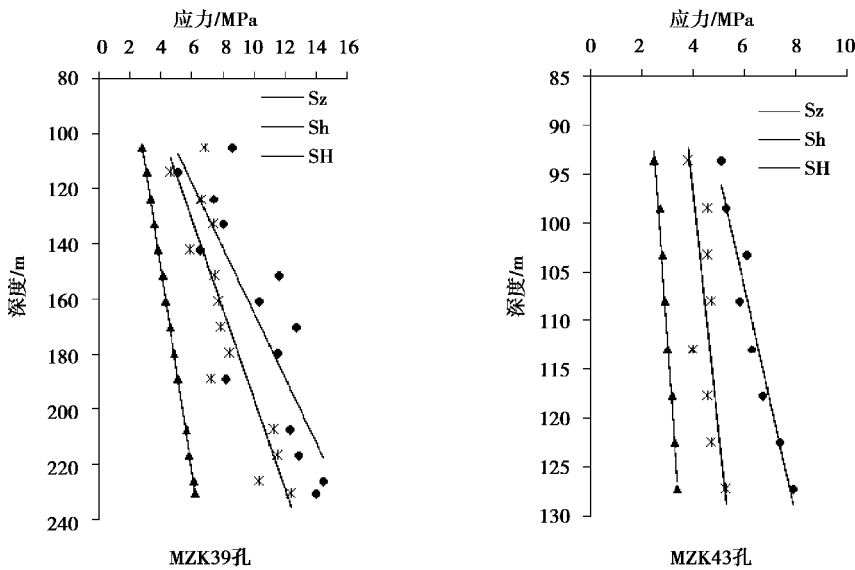


图 3 测试应力量值与埋深关系曲线

Fig. 3 Relationship between measured stress and depth

由图 3 可知,地应力量值随埋深的增加基本呈线性增大,两孔在测深范围最大水平主应力 σ_H 分别为 5.1~7.9 MPa、8.6~14.0 MPa,最小水平主应力 σ_h 分别为 3.8~5.3 MPa、6.8~12.4 MPa,铅直应力 σ_z 分别为 2.5~3.4 MPa、2.8~6.2 MPa;最大水平主应力方向分别为 N44°~35°E、N46°~65°E,平均 N39°E、N55°E(即 NE 向),与工程所处汾渭断陷渭河盆地区域构造主压应力方位相符。

由两孔的最大水平主应力 σ_H 与最小水平主应力 σ_h 量值进行线性回归,可获得两孔与岩体埋深 H 的线性回归关系分别为式(3)及式(4):

$$\begin{cases} \sigma_H = 0.058H + 0.6 \\ \sigma_h = 0.048H + 0.2 \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} \sigma_H = 0.08H - 2.6 \\ \sigma_h = 0.025H + 1.8 \end{cases} \tag{4}$$

两测孔分别位于黄柏峪及白石峪河谷冲沟,其

中,MZK39 孔附近山体至沟谷的最大落差达 320 m,MZK43 孔附近沟谷落差达 470 m,而两孔最大测深仅为 230.5 m 及 127.3 m,应力测试值在很大程度上受到地形的影响,即按实际测孔埋深计算可能低估了自重应力,使得侧压系数偏高。3 个主应力量值主要呈 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_z$ 特征,说明水平应力起主导作用,水平构造应力是地应力场中的主要影响因素。

2.4 隧洞围岩应力场评估

依据式(3)及(4)可以估算出 MZK39 孔和 MZK43 孔所在隧洞高程处的水平主应力。其中,MZK39 孔洞身围岩 $\sigma_H = 14.1$ MPa, $\sigma_h = 11.4$ MPa, $\sigma_z = 6.3$ MPa, $\sigma_{max} = 14.0$ MPa,则 $R_c/\sigma_{max} = 3.9$ (σ_{max} 为垂直隧洞轴线横截面内的最大初始应力),依据《工程岩体分级标准》(GB/50218—94),该类围岩最大埋深处硬质围岩应力等级属于极高应力水平,同时,依据《水力发电工程地质勘察规范》

(GB50287—2006), $R_c/\sigma_{\max}=3.9$,该应力水平属于高应力水平。

MZK43 孔洞身围岩 $\sigma_H=7.2\text{ MPa}$, $\sigma_h=4.9\text{ MPa}$, $\sigma_z=3.3\text{ MPa}$, $\sigma_{\max}=4.9\text{ MPa}$, 则 $R_c/\sigma_{\max}=13.4$ 。依据规范,该类围岩最大埋深处硬质围岩应力等级属于中低应力水平。

综上,两个测孔附近的隧洞围岩应力等级属于中低~高应力水平。

3 工程区应力场反演分析

3.1 应力场回归反演

根据设计部门的要求和以往的计算经验,本次回归反演考虑了地形地貌对工程区地应力场的影响,建立的地质计算模型中,计算域重点为引水洞线,并使测点位于计算域的中部。基于地质资料,在计算区域内引水隧洞主要穿越山前洪积扇及秦岭中低山两大地貌单元,考虑的主要岩性为第四系壤土,震旦系宽坪群二云石英片岩及燕山期花岗岩,构造不发育,各岩性力学参数如表 1。

表 1 岩体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock mass

岩性	风化程度	变形模量/GPa	泊松比	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	埋深/ m
壤土(表层)	强	0.006	0.35	2.02	0~20
	强	1.0	0.30	2.63	20~50
二云石英片岩 45+890~50+631 m	弱	2.0	0.25	2.67	50~80
	微	5.0	0.23	2.70	80~
	强	2.0	0.33	2.58	20~50
花岗岩 50+631~68+490 m	弱	8.0	0.28	2.60	50~80
	微	12.0	0.23	2.63	80~

模型计算范围为:长×宽=25 000 m×14 000 m,底部高程为▽-10 000 m,概化后的有限元计算模型如图 4。为方便建模,使得计算范围涵盖引水洞线,并置于中间,取 N 向为 X 轴,E 向为 Y 轴,铅直向上为 Z 轴。计算模型共计 165 821 个节点,546 226 个单元,均采用 8 节点的 SOLID185 单元。根据地应力场回归分析原理中假定^[13],采用线弹性材料本构模型,采用国际通用有限元分析程序

ANSYS 进行应力场的求解。

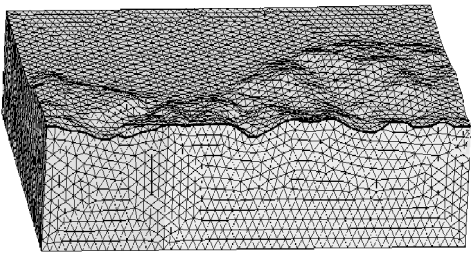


图 4 工程区三维有限元模型

Fig. 4 3-D finite element model of project area

根据实测结果,针对两个地应力测孔 MZK39、MZK43,选取测试结果中具有代表性的测点进行回归分析,反演结果与实测值的比较如图 5 所示。

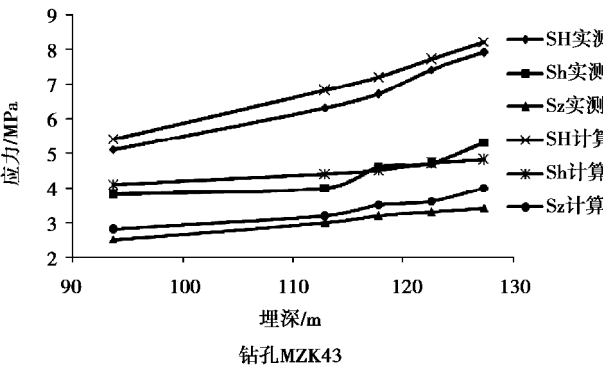
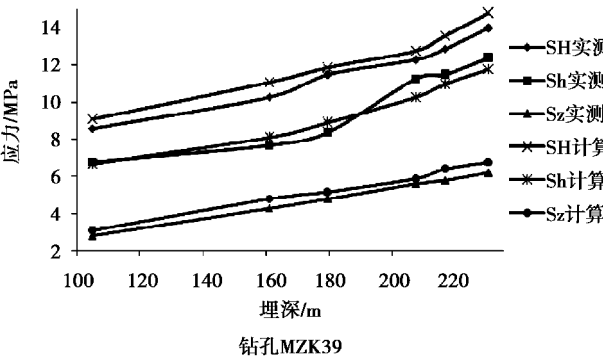


图 5 实测应力与反演结果对比

Fig.5 Comparison between measured stress and inversion results

从以上实测值与回归计算值的对比结果可知,实测值与回归计算值之间的误差较小,复相关系数 $r=0.893\ 2$,回归效果较好,得到的计算域内的地应力场是合理的,可为进一步分析工程地下洞室围岩的稳定性和隧洞设计与施工提供依据。

3.2 隧洞轴线方向应力分布规律

鉴于隧洞区地形、地质复杂,隧洞长达 22.6 km,测孔实测结果有限,需从回归分析结果出发,研究整个隧洞沿线围岩的地应力分布规律。依据隧洞平面布置图,沿隧洞轴线进行插值,其应力分

布如图 6 和图 7 所示。

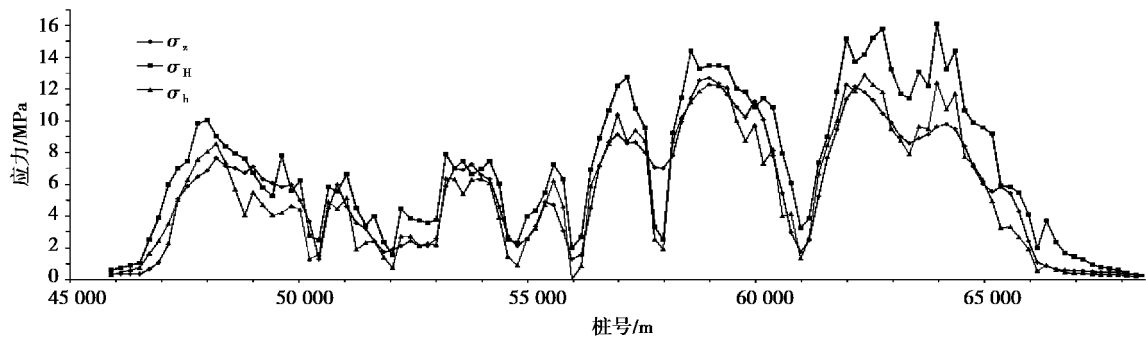


图 6 隧洞沿线设计高程应力分布

Fig. 6 Stress distribution along the design elevation of tunnel route

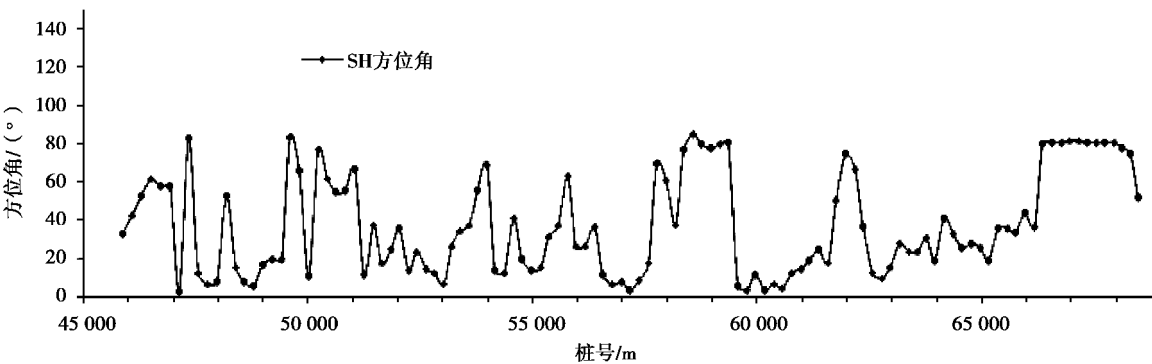


图 7 隧洞沿线设计高程最大水平主应力方位分布

Fig. 7 Distribution of the maximum horizontal principal stress direction in the design elevation of the tunnel route

桩号以隧洞进口里程 45 890 为起点,隧洞出口里程 68 490 为终点。由图 6 知,隧洞沿线设计高程的应力分量变化范围为:最大水平主应力为 0~16.1 MPa,最小水平主应力为 0~12.9 MPa,铅直应力为 0~12.7 MPa;在桩号 47 000~49 000、56 000~61 000 和 62 000~65 000 区间段水平主应力值较大,这与该范围内隧洞埋深较大直接相关;主应力值同样呈现出 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ 的趋势,水平主应力占主导地位;对比图 2(b) 和图 6 可知应力分布曲线与地势起伏曲线基本一致,隧道应力值主要随地势的高低而变化。

根据图 7 可知,受地形地貌及区域构造应力的影响,最大水平主应力方位沿隧洞轴线的变化主要集中在 $10^\circ \sim 80^\circ$ 之间,即 NNE~NEE,总体上与构造主压应力方向趋于一致。

对比图 6 与图 7 可看出,隧道沿线最大水平主应力方位的变化趋势与应力值的变化趋势基本相反,隧道埋深越大,最大水平主应力方位变化越稳定。尤其是在桩号 47 000~49 000、56 000~61 000 和 62 000~65 000 区间段,最大水平主应力方位主要稳定在 $N20^\circ E \sim N40^\circ E$ 范围内,与构造主压

应力方向一致,说明这三段隧洞的应力场主要受到构造应力作用的影响。而在其他段隧洞,最大水平主应力方位变化较大,主要受到构造应力场和地形的联合影响,但大方向上依然趋向于构造主压应力方向,说明整个隧道线的应力场分布特征受地形的影响较小,主要影响因素为构造应力场。

4 结论

(1)地应力量值随埋深的增加基本呈线性增大,3 个主应力量值主要呈 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ 特征,说明水平应力起主导作用,水平构造应力是地应力场中的主要影响因素;实测最大水平主应力方向均接近于 NE 向,与工程所处汾渭断陷渭河盆地区域构造主压应力方位相符。

(2)依据行业规范,对隧道围岩应力等级进行评估,两个测孔附近的隧洞围岩应力等级属于中低~高应力水平。

(3)根据实测资料对工程区应力场进行回归反演,对比可知反演应力与实测应力误差较小,回归效果较好。

(4)应力分布曲线与地势起伏曲线基本一致,

隧道应力量值主要随地势的高低而变化。受地形地貌及区域构造应力的影响,最大水平主应力方位沿隧洞轴线的变化范围主要在 $10^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 之间,即NNE~NEE,总体上与构造主压应力方向趋于一致。

隧道沿线最大水平主应力方位的变化趋势与应力量值的变化趋势基本相反,隧道埋深越大,最大水平主应力方位变化越稳定。尤其是在深埋段,最大水平主应力方位主要稳定在 $N20^{\circ}E \sim N40^{\circ}E$ 范围内,与构造主压应力方向一致,说明其应力场主要受构造应力作用的影响。

参考文献(References)

- [1] Haimson B C, Cornet F H. ISRM suggested methods for rock stress estimation-Part 3:Hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003, 40(7-8): 1011-1020.
- [2] 郭喜峰,尹健民,李永松,等. 引汉济渭工程黄三隧洞地应力测试研究[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(增2):1629-1631,1635.(Guo Xifeng, Yin Jianmin, Li Yongsong, et al. Studay on crustal stress measurement at huangsan tunnel of Hanjiang to Weihe River diversion project [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6 (Supp. 2): 1629-1631,1635. (in Chinese))
- [3] 周宏伟,谢和平,左建平.深部高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. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths [J]. Advances in Mechanics, 2005, 35 (1): 91-99. (in Chinese))
- [4] Cave S R, Edwards D W. Chemicalprocess route selection based on assessment of inherent environmental hazard[J]. Computers & Chemical Engineering, 1997, 21(1):31-36
- [5] 刘允芳,尹健民. 地应力测量方法和工程应用[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,2014. (Liu Yunfang, Yin Jianmin. Geostress measurement methods and engineering application[M]. Wuhan:Hubei Science and Technology Press, 2014.(in Chinese))
- [6] 侯明勋,葛修润,王水林.水压致裂地应力测量中的几

- 个问题[J]. 岩土力学,2003,24(5):840-844. (Hou Mingxun, Ge Xiurun, Wang Shuilin. Discussion on application of hydraulic fracturing method to geo stress measurement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24 (5): 840-844.(in Chinese))
- [7] 付成华,汪卫明,陈胜宏. 溪洛渡水电站坝区初始地应力场反演分析研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(11):2305-2312. (Fu Chenghua, Wang Weiming, Cheng Shenghong. Back analysis study of initial geostress field of dam site for Xiluodu hydropower project [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (11): 2305-2312. (in Chinese))
- [8] 宋立胜.陕西省地震志[M].北京:地震出版社,1989.(Song Lisheng. The earthquake records of Shanxi [M]. Beijin: Earthquake Press, 1989.(in Chinese))
- [9] 姜家兰.陕西及其邻近地区现代构造应力场[J].西北地震学报,1991,13(4):85-88.(Jiang Jialan. Recent tectonic stress field in Shanxi province and its adjacent area [J]. Northwestern Seismological Journal (in Chinese), 1991, 13(4): 85-88.(in Chinese))
- [10] 王卫东.西安地裂缝形成的区域稳定动力学背景研究[D].西安:长安大学,2010.(Wang Weidong. Study on the regional stability dynamical background in the forming of Xi'an Ground fissures[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.(in Chinese))
- [11] 谢振乾,方继安,田西堂,等.渭河盆地构造应力场演变及盆地形成机制分析[J].西安地质学院学报,1991,12(1):46-52.(Xie Zhenqian, Fang Jian, Tian Xitang, et al. The evolution of the structural stress field and analysis of the formation mechanism in the weihe basin [J]. Journal of Xi'an College of Geology (in Chinese), 1991, 12(1): 46-52.(in Chinese))
- [12] 彭建兵,张俊,苏生瑞,等.渭河盆地活动断裂与地质灾害[M].西安:西北大学出版社,1992. (Peng Jianbin, Zhang Jun, Su Shengrui, et al. The activity faults and ground fissures disaster of weihe basin [M]. Xi'an: Northwestern University Press, 1992.(in Chinese))
- [13] 李青麟.初始应力场的回归与三维拟合[J].岩土工程学报,1998,20(5):68-71.(Li Qinglin, Regression analysis and 3-D fitting of initial stress [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(5): 68-71.(in Chinese))