

引用格式：朱明德，王照亚，张月征，等，2023. 基于水压致裂法的三山岛深竖井工程区地应力测量与反演分析[J]. 地质力学学报，29(3): 430-441. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20232911

Citation: ZHU M D, WANG Z Y, ZHANG Y Z, et al., 2023. In-situ stress measurement and inversion analysis of the deep shaft project area in Sanshan Island based on hydraulic fracturing method[J]. Journal of Geomechanics, 29(3): 430-441. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20232911

## 基于水压致裂法的三山岛深竖井工程区地应力测量与反演分析

朱明德<sup>1,2</sup>，王照亚<sup>3</sup>，张月征<sup>4,5</sup>，李文光<sup>3</sup>，侯奎奎<sup>1,2</sup>，纪洪广<sup>4,5</sup>，尹延天<sup>1,2</sup>，  
付 桢<sup>4,5</sup>，郝英杰<sup>1,2</sup>

ZHU Mingde<sup>1,2</sup>，WANG Zhaoya<sup>3</sup>，ZHANG Yuezheng<sup>4,5</sup>，LI Wenguang<sup>3</sup>，HOU Kuikui<sup>1,2</sup>，JI Hongguang<sup>4,5</sup>，  
YIN Yantian<sup>1,2</sup>，FU Zhen<sup>4,5</sup>，HAO Yingjie<sup>1,2</sup>

1. 山东黄金集团有限公司深井开采实验室，山东 莱州 261400；
2. 山东省深海深地金属矿智能开采重点实验室，山东 莱州 261400；
3. 山东黄金矿业（莱州）有限公司三山岛金矿，山东 莱州 261400；
4. 北京科技大学城市地下空间工程北京市重点实验室，北京 100083；
5. 矿山深井建设技术国家工程研究中心，北京 100013

1. *Deep Mining Laboratory of Shandong Gold Group Co Ltd, Laizhou 261400, Shandong, China;*
2. *Shandong Key Laboratory of Deep-sea and Deep-earth Metallic Mineral Intelligent Mining, Laizhou 261400, Shandong, China;*
3. *Sanshandao Gold Mine of Shandong Gold Mining Industry Co., Ltd., Laizhou 261400, Shandong, China;*
4. *Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;*
5. *National Engineering Research Center of Deep Shaft Construction, Beijing 100013, China*

### In-situ stress measurement and inversion analysis of the deep shaft project area in Sanshan Island based on hydraulic fracturing method

**Abstract:** The proposed 2000-meter-deep auxiliary shaft at the Xiling mine, Sanshan Island, Shandong Province, is an ultra-deep shaft construction project. Revealing the characteristics of the in-situ stress field in the shaft construction area is one of the necessary prerequisites for the design and construction of the shaft. We measured the in-situ stress in the deep shaft by hydraulic fracturing method to a depth of 1899.00 m and inverted the 2017.56-meter-deep in-situ stress field in the shaft construction area by numerical simulation. The results show that the maximum horizontal principal stress ( $S_H$ ) ranges from 23.16 to 70.86 MPa, and the minimum horizontal principal stress ( $S_h$ ) from 15.24 to 47.06 MPa in the depth range from 357.76 to 1899.00 m in the borehole tested by hydraulic fracturing; the principal stress increases nearly linearly with depth, and the measured maximum horizontal principal stress directions in the measured boreholes are NW 55.5°, NW 60.4°, and NW 58.4°, respectively. Horizontal stress mainly dominates the stress field in the shaft engineering area, the vertical stress ( $S_v$ ) below 1200.00 m is the intermediate stress, and the average value of the ratio of  $S_H$  to  $S_v$  is 1.53. The in-situ stress field distribution pattern in the well-construction area with depth and stratigraphic changes is obtained by inversion analysis of FLAC 3D software. The inversion results are basically consistent with the measured values. It provides the fundamental scientific basis for shaft wall design and engineering risk assessment of shaft projects.

**Keywords:** deep shaft; deep strata; hydraulic fracturing; In-situ stress measurement; in-situ stress inversion

**摘 要:** 山东省三山岛西岭矿区拟建 2000 m 深副井，属于超深井建设工程。揭示建井工程区地应力场特

基金项目：山东省自然科学基金项目（ZR2021ZD36）

This research is financially supported by the Shandong Provincial Natural Science Foundation (Grant ZR2021ZD36)

第一作者：朱明德（1988—），男，硕士，主要从事岩石力学与地应力测量等相关工作。E-mail: zhumingde@sd-gold.com

通讯作者：王照亚（1969—），男，高级工程师，主要从事岩石力学基础理论与岩土工程相关工作。E-mail: wangzhaoya@sd-gold.com

收稿日期：2023-02-28；修回日期：2023-04-25；责任编辑：范二平

征是开展竖井设计、建设施工的必要先决条件之一,研究中采用水压致裂法开展了深部竖井地应力现场测量工作,测量深度达到1899.00 m,通过数值仿真模拟方法反演了竖井工程区2017.56 m深的地应力场。结果表明:在水压致裂测试的钻孔357.76~1899.00 m深度范围内,最大水平主应力( $S_H$ )为23.16~70.86 MPa,最小水平主应力( $S_h$ )为15.24~47.06 MPa;主应力随深度近于线性增加,地应力测量孔实测最大水平主应力方向分别为NW55.5°、NW60.4°、NW58.4°,为近北西方向;竖井工程区应力场主要以水平应力为主导,1200.00 m以下铅直主应力( $S_v$ )为中间应力, $S_H$ 与 $S_v$ 之比平均值为1.53;通过FLAC 3D软件的反演分析获得了建井工程区内地应力场随深度、地层变化的分布规律,测试点的反演结果与实测值基本一致。近2000 m超深地层地应力状态及其分布规律,为竖井工程的井筒井壁设计和工程风险评估提供了基础科学依据。

**关键词:** 深竖井; 深部地层; 水压致裂法; 地应力测量; 地应力反演

**中图分类号:** P553      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1006-6616 (2023) 03-0430-12

**DOI:** 10.12090/j.issn.1006-6616.20232911

## 0 引言

地应力是引起地壳结构、岩石圈变形的原始动力(Amadei and Stephansson, 1997; 盖海龙等, 2021; 贾晨, 2021; 李剑伟和何勇, 2021),是造成深部工程围岩片帮、岩爆和大变形等动力灾害的主要原因,是分析深竖井工程建设施工、长期服役面临工程风险的基础数据之一(蔡美峰, 1993, 2001; 蔡美峰等, 1999)。

地应力场的形成过程和现存状态是地层中岩体开挖后产生变形的根本力学因素,准确获取深部地层中地应力信息是进行深部巷道围岩稳定性分析与支护设计的前提条件(尹健民等, 2014; 王成虎等, 2020; 张浩等, 2020; 尚晓光等, 2021; 李彬等, 2022; 孟文等, 2022)。与浅部相比,深部地层中地应力更大,温度更高,围岩体赋存条件更为复杂。目前,水压致裂法是国际上最广泛使用的地应力测试方法之一(Gale and Blackwood, 1978; 朱焕春和陶振宇, 1994; 陈群策等, 1998; Montone et al., 1999; 何满潮, 2004; 蔡美峰等, 2006; 赵德安等, 2007),随着地下工程的逐渐加深,地应力的测量工作尤为重要,难度也在不断增大(苏恺之, 1985; 王连捷和潘立宙, 1991; 王思敬, 2009; 孟秋等, 2021)。彭华等(2011)应用深孔水压致裂地应力测量技术对赵楼煤矿1000 m的工程勘察孔开展地应力测量工作,获得了赵楼煤矿矿区的应力状态。吴满路等(2008)对金川二矿1000 m中段进行了系统的地应力测量,探明了深部应力的具体分布特征及其变化规律。秦向辉等(2020)利用新型水压致裂测量系统开展现场试验,系统地研究了水压致裂测量系统柔度的影响作用,并提出了准确获取关闭压力的新方法——“关

闭试验法”,该方法可提高测量的准确性,并通过该方法取得了良好的试验成果。张春山等(2016)在长白山不同地点进行了原地地应力测量,获得了长白山地区的地应力状态。通过水压致裂地应力测量技术的不断发展和实践,其已在国内深部矿山(1000 m)得到广泛应用。

山东省三山岛金矿为满足深部矿产资源的开发利用,拟在西岭矿区建设深度达2000 m的竖井作为矿区副井,属于超深竖井工程。由于深部地层应力、地质条件的复杂性,不确定性因素和未知因素更多、更复杂,工程条件显著变化,给建井工程带来的风险也大大提高。该矿多年的开采与研究经验表明,深部地层处在高应力、强压缩状态下,岩石硬度大、储能水平高。深竖井井壁和硐室结构材料在高应力的作用下,容易产生强烈的岩石动力灾害;且随着深度增加,地应力线性增加,达到一定深度时,因受围岩的约束作用,整个深部地层岩体均处于强压缩应力状态,一旦外界条件发生变化,岩体自身的应力就会将岩石压碎,能量急剧释放,对深部井巷工程造成破坏,给掘进、支护等施工工艺带来严峻挑战。

目前中国金属矿竖井深度普遍在1000 m以浅,而三山岛西岭矿区副井拟建深度达2000 m。文中改进了水压致裂装置,通过增加保护套筒来收集地应力测试过程中的细碎砂石,从而起到保护封隔器的作用,使之更适用于深孔测试(张月征等, 2019),利用2017.56 m工程勘察孔开展了水压致裂法原位地应力实测研究,采用大型数值软件反演分析建井区域地层应力场的分布规律及其影响因素,以期获取建井区域1500~2000 m内的应力场分布规律,为竖井工程的施工设计与风险评估提供地应力数据。

## 1 水压致裂原位地应力测量

### 1.1 矿区工程地质概况

三山岛金矿位于山东省胶东半岛北部,处于古老的基底变质变形岩系、多期多成因的岩浆活动和以北东向断裂为主的构造格架中,在区域构造上位于沂沭断裂带东侧,矿区地质受控于区域性的东西向构造体系和北北东向的新华夏系构造体系(图1)。矿床工业矿体主要赋存在三山岛-仓上断裂带中,岩性以黄铁矿绢英岩化花岗碎裂岩、绢英岩化碎裂岩及绢英黄铁矿化碎裂岩为主,矿床顶板和底板岩性为绢英岩化花岗岩、绢英岩化碎裂岩、黄铁矿绢英岩化花岗碎裂岩等,岩石比较坚硬,工程地质条件良好。矿床工程地质条件取决于岩石构造发育程度,区内断裂构造较发育,断裂带内局部岩石较破碎,蚀变较强烈,裂隙较发育,稳定性相对较差。



Q—第四系平原区; MJ—牟平—即墨构造混杂带; JD—胶东侵入岩变质区; JB—胶北隆起; JL—胶莱塌陷区; JN—胶南隆起区

图1 西岭副井工程地质勘察图

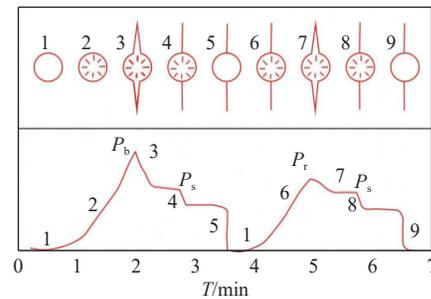
Fig. 1 Engineering geological map of the Xiling auxiliary shaft

Q—Quaternary plain; MJ—Muping—Jimo tectonic hybrid zone; JD—Jiaodong intrusive metamorphic zone; JB—Jiaobei uplift zone; JL—Jiaolai subsidence zone; JN—Jiaonan uplift zone

### 1.2 测量方法

在不具备井下开拓空间的条件下,在深部钻孔中采用水压致裂法进行地应力测试是最为直接的方法。水压致裂原位地应力测量是以弹性力学为基础,在测量地点须遵从3个假设:①岩石是线弹性和各向同性的;②岩石是完整的;③岩层中有一个主应力分量的方向与孔轴平行。测试过程中判读临界破裂压力( $P_b$ )、裂隙重张压力( $P_r$ )、瞬时闭

合压力( $P_s$ ),从而计算获得岩层原始应力水平和抗拉强度,水压致裂过程中对应的3种压力如图2所示。测量设备采用SY-2010型单回路地应力测量系统(图3)。在开展原位地应力测量之前首先进行测试段,而测段的地层须完整性良好,并保证足够的测试密度,经详细分析现场地质资料、岩芯状况,在357.00~1899.00 m范围内布置了23个满足要求的测段,其间隔平均为50~60 m;并对其中3个点(509.35 m、1097.50 m、1512.50 m)开展了印模定向试验,现场测试中的印模过程如图4所示。



1—准备施压阶段; 2—施压阶段; 3—压裂阶段; 4—泄压阶段; 5—裂纹闭合阶段; 6—重新施压阶段; 7—裂隙重新张开阶段; 8—重新泄压阶段; 9—裂纹闭合阶段

图2 测量典型压裂过程曲线

Fig. 2 Curves of a typical fracturing process

1—preparation for pressure application; 2—pressure application; 3—fracturing; 4—pressure relief; 5—fracture closure; 6—re-application of pressure; 7—fracture re-opening; 8—re-relief of pressure; 9—fracture closure

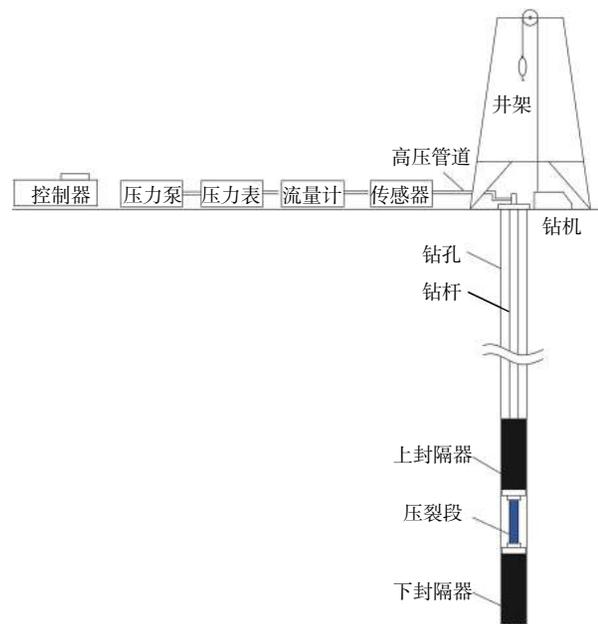


图3 单回路水压致裂地应力测量系统

Fig. 3 Schematic diagram of the new single-loop hydrofracture in-situ stress measurement system



图 4 测量系统的印模装置

Fig. 4 Impression devices for measurement system

在计算最大水平主应力时,需要岩层的孔隙压力值。在水压致裂法地应力测量过程中,通常以测段所处地下水位的静水压力( $P_H$ )代替岩层的孔隙压力( $P_0$ )。压裂参数中破裂压力( $P_b$ )、重张压力( $P_r$ )、瞬时闭合压力( $P_s$ )均为测段部位的实际量值, $P_H$ 是测段中心的静水压力。压裂曲线中的  $P_{b\text{地面}}$ 、 $P_{r\text{地面}}$ 、 $P_{s\text{地面}}$  值均为地面记录值,三者之间的关系见公式(1)–(3):

$$P_b = P_{b\text{地面}} + P_H \quad (1)$$

$$P_r = P_{r\text{地面}} + P_H \quad (2)$$

$$P_s = P_{s\text{地面}} + P_H \quad (3)$$

静水压力、最小水平主应力、最大水平主应力求解过程见公式(4)–(6)(彭华等, 2011):

$$P_H = \gamma_w H \quad (4)$$

$$S_h = P_s \quad (5)$$

$$S_H = 3P_s - P_b - P_0 \quad (6)$$

式中:  $S_h$ —最小水平主应力,  $S_H$ —最大水平主应力,  $\gamma_w$ —水的容重,  $H$ —测点到孔口距离。

## 2 水压致裂地应力测量结果与分析

### 2.1 地应力测量结果

部分典型测段的压力记录曲线如图 5 所示,压力记录曲线较为标准,破裂压力峰值确切、明显,各个循环重复测量的规律性很强,各个循环测得的压裂参数具有良好的 consistency,可用于计算求解各测段的应力状态。

通过对各个测段的压力记录曲线整理、分析与判别,确定了各测段的破裂压力( $P_b$ )、裂缝重张压力( $P_r$ )、裂缝瞬时闭合压力( $P_s$ )、岩层的孔隙压力

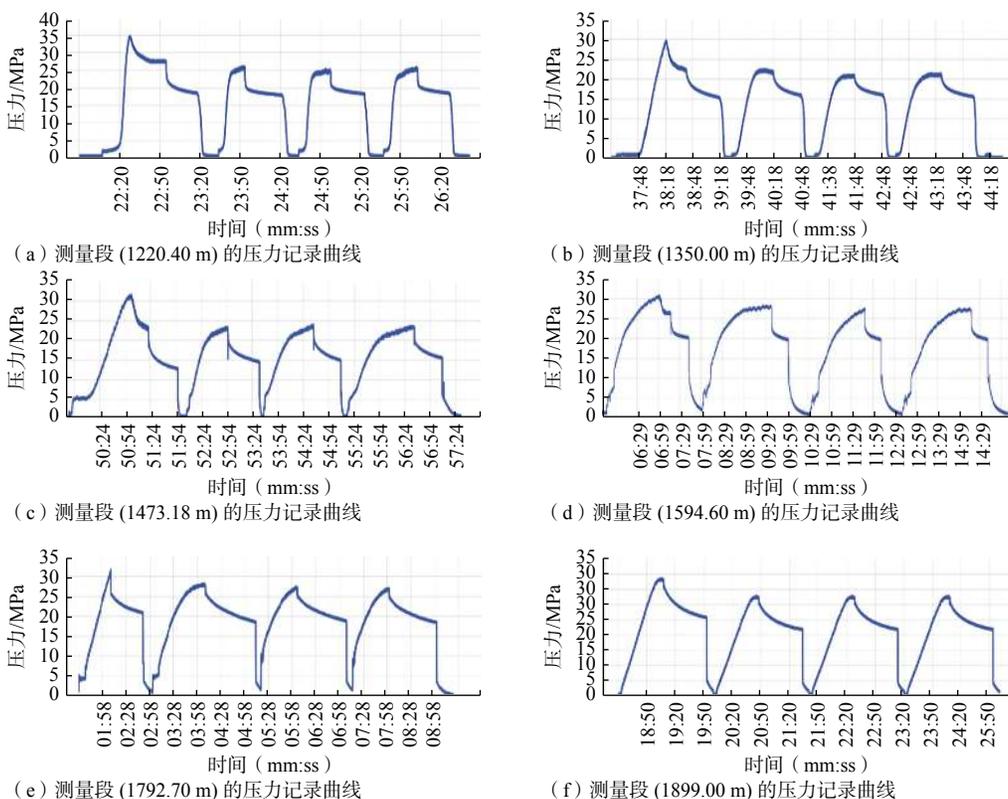


图 5 水压致裂典型压力曲线

Fig. 5 Typical curves of hydraulic fracturing pressure

( $P_0$ )以及测段岩石的原地抗拉强度( $T$ )。根据上述测得的各压力参数及相应公式,得到最大、最小水平主压力值( $S_H$ 、 $S_h$ )及铅直主应力值( $S_v$ ),23个测段

的水压致裂测量结果如表1所示。其中,铅直主应力值是根据水压致裂理论,按照上覆岩层的厚度计算得到的,计算中土层和岩石的平均容重取 $2.7\text{ g/cm}^3$ 。

表1 三山岛金矿西岭矿区副井勘察孔水压致裂原地应力测量结果

Table 1 Results of hydraulic fracturing in-situ stress measurements in the borehole of the auxiliary shaft at the Xiling deposit, Sanshandao gold mine

测段深度/m	压裂参数/MPa					主应力值/MPa			破裂方位
	$P_b$	$P_r$	$P_s$	$P_o$	$T$	$S_H$	$S_h$	$S_v$	
357.76	20.02	15.54	11.73	3.51	4.48	23.16	15.24	9.47	
431.09	24.57	15.78	11.85	4.22	8.79	23.99	16.08	11.41	
509.35	25.15	20.29	13.44	4.99	4.86	25.02	18.43	13.48	NW55.5°
608.26	25.16	18.82	14.35	5.96	6.34	30.20	20.31	16.39	
665.33	24.34	21.39	14.75	6.52	2.95	29.37	21.27	17.60	
881.70	30.22	23.09	16.29	8.64	7.14	34.42	24.93	23.33	
957.10	25.86	22.54	16.57	9.38	3.33	36.56	25.95	25.32	
1010.50	23.06	19.19	16.48	9.90	3.87	40.14	26.38	27.23	
1097.50	30.43	25.72	20.19	10.76	4.71	45.62	30.95	29.04	NW60.4°
1166.41	34.84	25.94	20.50	11.43	8.90	46.99	31.93	30.86	
1220.40	34.40	25.31	20.44	11.96	9.09	47.96	32.40	32.29	
1275.80	32.79	23.63	19.52	12.50	9.16	47.43	32.02	34.38	
1350.00	29.30	21.84	18.62	13.23	7.47	47.25	31.85	35.72	
1408.00	28.02	23.36	19.32	13.80	4.66	48.40	33.12	37.26	
1473.18	31.93	24.09	20.59	14.44	7.85	52.12	35.03	38.98	
1512.50	31.01	24.98	20.75	14.82	6.04	52.11	35.58	40.02	NW58.4°
1594.60	31.82	26.59	22.12	15.63	5.23	55.40	37.75	42.19	
1643.63	38.98	29.43	24.70	16.11	9.55	60.79	40.81	44.30	
1689.50	37.83	28.31	24.46	16.56	9.52	61.63	41.02	44.70	
1756.80	34.89	30.65	26.39	17.22	4.24	65.72	43.60	46.48	
1792.70	32.69	27.70	24.83	17.57	4.99	64.37	42.40	47.43	
1839.00	37.35	28.73	25.43	18.02	8.62	65.58	43.45	49.56	
1899.00	42.47	33.10	28.45	18.61	9.37	70.86	47.06	50.25	

## 2.2 地应力测量结果分析

基于实测数据计算获得的3个主应力方向的结果显示,在深度357.00~1899.00 m范围内最大水平主应力( $S_H$ )为23.16~70.86 MPa,最小水平主应力( $S_h$ )为15.24~47.06 MPa,铅直主应力( $S_v$ )为9.47~50.25 MPa,基于23个测段的 $S_H$ 、 $S_h$ 和 $S_v$ 绘制了主应力随深度的变化规律(图6a),并拟合出测点各主应力线性回归方程(7)~(9):

$$S_H = 9.26 + 0.031D \quad (7)$$

$$S_h = 7.56 + 0.020D \quad (8)$$

$$S_v = 0.00 + 0.027D \quad (9)$$

式中: $D$ —钻孔深度(向下为正),m。

地壳浅层变形和内部构造活动、断裂滑动失稳

和地下工程开挖等对地应力状态具有重要影响,地应力大小是地下工程设计的基本参数,直接影响工程岩体的力学行为。通过对比国内金矿地应力水平,该区最大水平主应力与深度的关系系数为0.031,低于国内平均值0.0401,而最小水平主应力与深度的关系系数为0.020,与国内平均值0.0209相近(李鹏和苗胜军,2017;李书强等,2017)。但就工程活动的深度而言,主流的矿井和开采深度都在1500 m以浅范围,2000 m深竖井的水压致裂法原位地应力测量中深部最大水平主应力竟达到了70 MPa以上,按照一般硐室开挖形成的最大围岩应力是最大水平主应力的2倍估算,140 MPa的应力将达到大部分岩石的抗压强度极限,此处的工程开挖必然引发片帮、冒顶和岩爆、突水等一系列工程

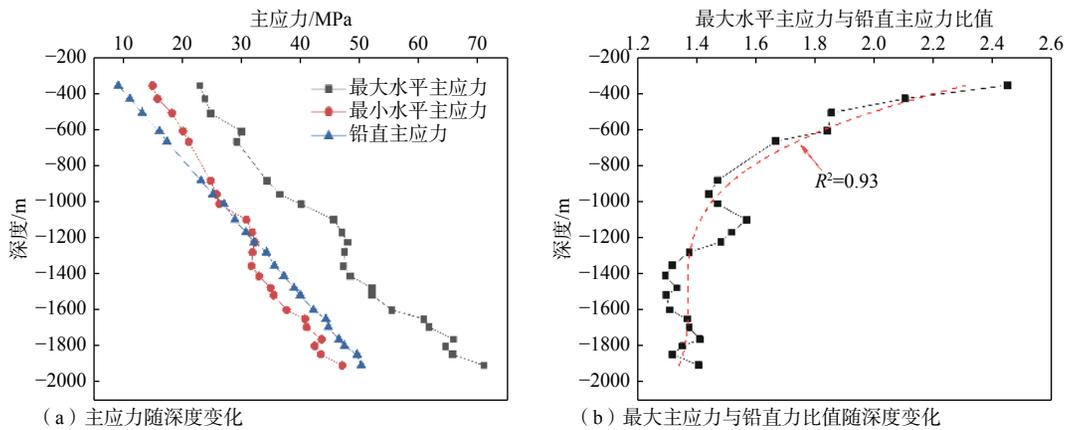


图6 西岭金矿钻孔主应力值随深度变化图与应力关系图

Fig. 6 Variation of principal stresses with depth and stress diagram in the Xiling gold deposit

(a) Variation of principal stresses with depth; (b) Ratio of maximum principal stress to vertical stress

灾害问题。

从主应力值随深度的变化趋势来看, 勘探区应力场主要以水平应力为主导, 1200.00 m 以下铅直主应力( $S_v$ )为中间应力, 这一结果与山东地区现今地应力场特征基本相似, 山东地区应力状态主要为 $S_H > S_h > S_v$ 型和 $S_H > S_v > S_h$ 型(李鹏等, 2017)。对比浅部与深部地应力状态, 在 1000.00 m 以浅, 地应力状态为 $S_H > S_h > S_v$ , 最小水平主应力为中间主应力, 而在 1000.00 m 以深, 地应力状态逐渐转变为 $S_H > S_v > S_h$ , 铅直主应力为中间主应力。图 6b 中显示, 最大水平主应力( $S_H$ )与铅直主应力( $S_v$ )比值随着深度的增加整体呈反比例函数形式逐渐减小, 且逐渐向 1.30 逼近, 这说明随着深度的增加, 最大水平主应力值逐渐接近于铅直主应力值。通过与山东地区对比, 测区内最大水平主应力( $S_H$ )与铅直主应力( $S_v$ )比值为 1.30~2.45, 平均为 1.53, 较为接近山东地区的平均值 1.46(李鹏等, 2017), 符合山东地区地应力分布规律。

地应力场各主应力方向多与该地区构造分布和现今构造活动有关, 受半岛地区板块运动影响, 断裂构造多为北东走向, 因此该地区的最大水平主应力方向总体上应与之垂直, 矿区内胶东断块在燕山构造运动中形成较多断裂, 普遍发生左旋平移, 并伴随中酸性岩浆岩侵入, 不同方向和规模的断裂十分发育, 其中尤以北东、北北东向最为发育, 北西向次之(侯奎奎等, 2022)。此次印模定向测试中西岭金矿地应力测量孔实测最大水平主应力方向平均为 NW58.1°, 为近北西向, 与滨海金属矿区地应力规律(矿区最大水平主应力方向为北西西向; 侯奎

奎等, 2022)结果相符, 基本与该地区断裂构造方向垂直。

### 3 竖井工程区地应力场反演与分析

从实测数据可见, 一方面由于测量误差的存在, 另一方面地层结构作为一个非均质体, 与断层伴生形成的局部断裂构造、富水地层和封闭空间超孔隙水压等因素, 都会造成地应力实际测值的变化曲线趋势和实际存在偏差, 例如, 局部显著的斜率变化。同时, 由于地层的复杂性, 范围更大的建井工程区应力场特征对计算井筒变形、开展进一步的工程风险分析更为重要, 研究中常基于实测点数据采用数值仿真方法反演区域应力场随空间的变化规律。根据建井开挖扰动的影响范围, 模型尺度以井筒为中心, 宽度为 100 m、长度为 100 m、深度为 2017.56 m, 并在模型中建立直径为 7 m, 深度为 2017.56 m 的井筒。

#### 3.1 地质模型建立物理力学参数

在确定建模尺度后, 根据地层中岩性、岩体质量和构造分布随深度的变化, 对主要地层进行分组。模型从上到下共计 12 个工程岩组: 基岩风化带岩组(0~28.93 m, 厚度 28.93 m); 二长花岗岩岩组(28.93~935.66 m, 厚度 906.73 m); 钾化花岗岩岩组(935.66~1001.10 m, 厚度 65.44 m); 二长花岗岩岩组(1001.10~1051.07 m, 厚度 49.97 m); 绢英岩化花岗岩岩组(1051.07~1064.37 m, 厚度 13.30 m); 二长花岗岩岩组(1064.37~1651.76 m, 厚度 587.39 m); 绢英岩化花岗岩岩组(1651.76~1674.36 m, 厚度 22.60 m);

二长花岗岩岩组(1674.36~1722.96 m, 厚度 48.60 m); 绢英岩化花岗质碎裂岩岩组(1722.96~1756.76 m, 厚度 33.80 m); 二长花岗岩岩组(1756.76~1973.76 m, 厚度 217.00 m); 煌斑岩岩组(1973.76~1983.66 m, 厚度 9.90 m); 云英岩岩组(1983.66~2017.56 m, 厚度 33.90 m)。根据岩石力学实验结果, 计算选取的岩石力学参数见表 2。

表 2 岩石物理力学实验结果统计表

Table 2 Statistics of the physical and mechanical measurements of rocks

采样深度/m	岩性	工程岩组	抗拉强度 $\sigma_t$ /MPa	抗剪强度(直剪)		弹性模量 $E_{50}/\times 10^3$ MPa	泊松比 $\mu_{50}$		
				黏聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$				
4.73~16.93	裂隙较发育, 岩芯以碎块、块状为主, 部分碎屑状	基岩风化带岩组	1.840	4.14	43.60	23.300	0.23		
			3.980			19.700	0.30		
			2.300			31.600	0.18		
38.00~55.00	裂隙较发育, 岩芯以柱状为主, 少量碎块	二长花岗岩岩组	6.427	10.43	59.40	3.748	0.11		
340.00~400.00			4.914			5.983	0.02		
525.00~580.00			4.493			13.00	42.83	7.689	0.27
760.00~800.00			6.049			10.81	58.07	5.302	0.40
935.00~1000.00	裂隙发育, 岩芯以柱状、块状、碎块居多, 局部小段呈碎屑状	钾化花岗岩岩组	5.350	4.39	53.11	5.500	0.05		
1000.00~1050.00	裂隙密集, 岩芯以块状、碎块为主	二长花岗岩岩组	5.462	7.82	44.21	4.763	0.21		
1050.00~1064.00	裂隙发育, 岩芯以块状为主, 局部碎块状	绢英岩化花岗岩岩组	6.151	7.89	55.86	3.958	0.24		
1140.00~1170.00	裂隙密集, 岩芯以块状为主, 局部碎块状	二长花岗岩岩组	5.827	3.61	44.58	2.746	0.05		
1300.00~1400.00			5.305			6.26	45.17	1.837	0.12
1650.00~1700.00	裂隙密集, 岩芯以块状、碎块为主	绢英岩化花岗岩岩组	3.251	6.00	36.43	5.165	0.27		
1722.96~1728.16	裂隙密集, 岩芯以块状、碎块为主	二长花岗岩岩组	3.380	5.17	53.50	21.800	0.20		
			4.560			20.500	0.11		
			4.820			26.100	0.09		
1728.66~1740.46	裂隙密集, 岩芯以块状、碎块为主	绢英岩化花岗质碎裂岩岩组	3.940	7.35	54.30	36.200	0.14		
			4.990			38.800	0.12		
			5.830			46.300	0.05		
			7.300			43.500	0.09		
			6.680			57.300	0.13		
1740.46~1756.76	6.530	10.54	53.30	42.300	0.06				
1800.00~1870.00	裂隙密集, 岩芯以块状、碎块为主	二长花岗岩岩组	7.360	12.20	53.40	50.500	0.10		
			8.310			47.900	0.09		
			9.130			48.800	0.03		
			7.160			59.800	0.07		
1960.00~1980.00	裂隙密集, 岩芯以块状、碎块为主	二长花岗岩岩组	8.810	11.47	54.40	45.400	0.12		
			6.710			47.400	0.04		
			7.540			85.700	0.03		
1974.00~1983.00	裂隙发育, 岩芯以块状、碎块为主, 线裂隙率为10条/米左右	煌斑岩岩组	12.000	14.70	58.30	92.200	0.09		
			9.480			95.200	0.10		
			7.580			52.500	0.11		
1990.00~2000.00	裂隙发育, 岩芯以块状、碎块为主	云英岩岩组	5.700	9.54	53.60	63.800	0.12		
			6.160			53.900	0.13		
			2.530			9.320	0.45		
			2.170			11.000	0.34		
2000.00~2015.00			2.940	2.70	45.20	7.950	0.24		

### 3.2 模型建立

仿真计算软件选用FLAC3D,建立了100 m×100 m×2017.56 m的地质模型(图7),由于此次模拟分析范围较大,如果网格划分不合理则给后期计算带来困难,甚至出现不收敛的情况。为了在保证计算精度的同时降低计算量,岩体网格按10 m划分,井筒围岩则进行了加密,整体网格布置由内向外逐渐稀疏。采用三角形加四边形混合网格进行划分,划分后共生成节点221645,划分单元数为331499(图7)。

### 3.3 计算结果分析

根据地应力实测结果以及主应力随深度的线

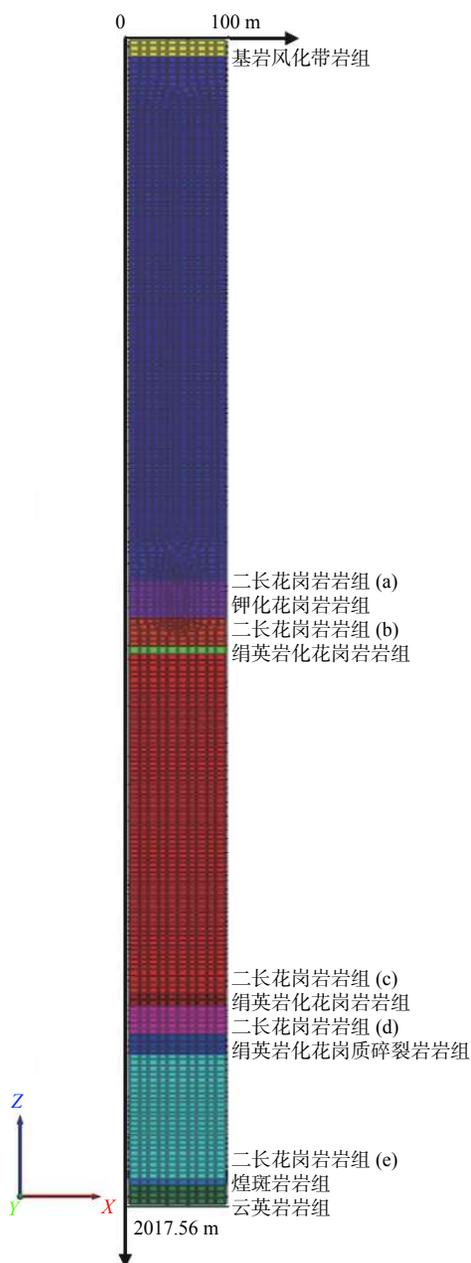


图 7 地质模型图和网格细节图  
Fig. 7 Geological model map and grid details

性变化关系(公式(7)–(9)),在X方向施加最大水平主应力( $S_{H1}$ ),在Y方向施加最小水平主应力( $S_{H2}$ ),在Z方向施加覆盖地层重力大小的铅直主应力,同时施加X、Y、Z方向的固定约束条件,在FLAC3D中进行模拟,得到了最大和最小水平主应力云图(图8,图9)、铅直方向主应力云图(图10),进而反演获得整个计算域的初始地应力场随空间的分布规律。

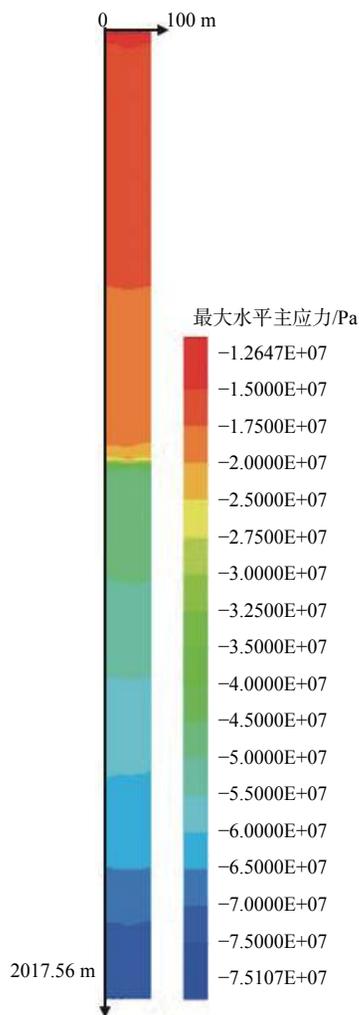


图 8 最大水平主应力云图  
Fig. 8 Cloud of maximum horizontal principal stress

通过数值分析,获得了2017.56 m以浅的应力场分布规律,随着深度的增加,最大水平主应力、最小水平主应力和铅直主应力值整体上均呈现增大趋势(图8—图10;图中负号表示地层受压),数值分析得到1899.00 m处最大水平主应力计算值约为73.32 MPa,通过水压致裂现场试验测得1899.00 m处最大水平主应力值为70.86 MPa;数值分析得到最小水平主应力值在1899.00 m处约为50.00 MPa,现场水压致裂实测最小水平主应力值在1899.00 m处为47.06

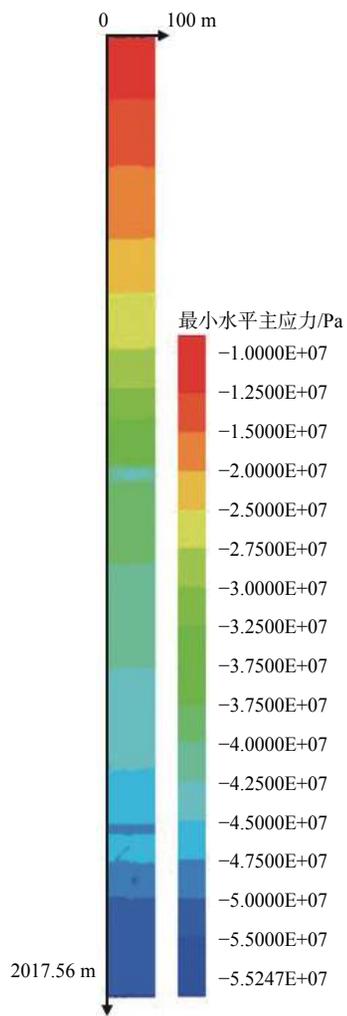


图9 最小水平主应力云图

Fig. 9 Cloud of minimum horizontal principal stress

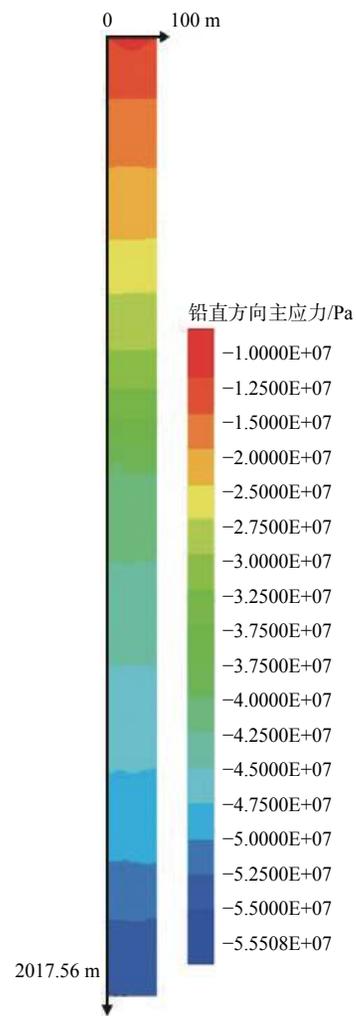


图10 铅直方向主应力云图

Fig. 10 Cloud of vertical stress

MPa; 数值分析得到铅直主应力值在 1899.00 m 处约为 52.30 MPa, 现场水压致裂实测铅直主应力值在 1899.00 m 处为 50.25 MPa。通过对比部分实测值和反演值(图 11), 在 1250.00~1600.00 m 深度区间内, 最大水平主应力实测值与反演值相差 2.89 MPa, 最小水平主应力实测值与反演值相差 6.92 MPa, 铅直主应力实测值与反演值相差 2.30 MPa, 两者结果存在一定误差, 分析其主要原因为: 一是模型建立时, 地层划分不能完全反映原始地层的真实分布情况; 二是地层参数取值与真实地层有误差; 三是模拟范围进入超深地阶段, 现有的强度模型不能准确地反应出深部岩体自身的强度准则, 但整体规律基本相似。总体而言对比实测值和反演值可见, 在一定误差范围内, 实测值与反演值相互印证, 所获得的结果可以为矿山工程设计、工程风险预测与控制提供基础依据。

井筒开挖过程中, 不同深度地层中井筒围岩的

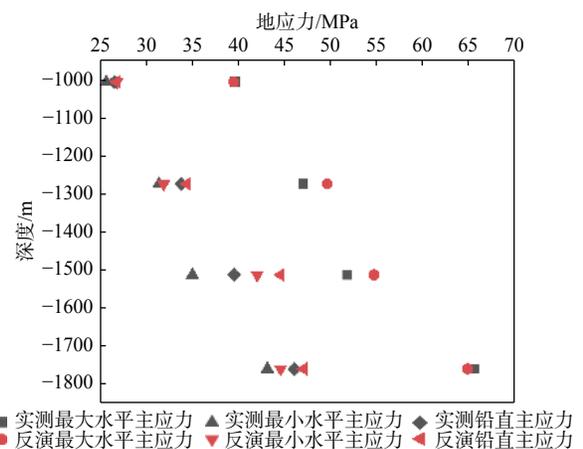


图11 实测值和理论计算值对比图

Fig. 11 Comparison of measured and theoretically calculated values

破坏类型分布如图 12 所示。在地应力场的作用下, 地层发生变形, 监测应力符合屈服准则的区域为潜

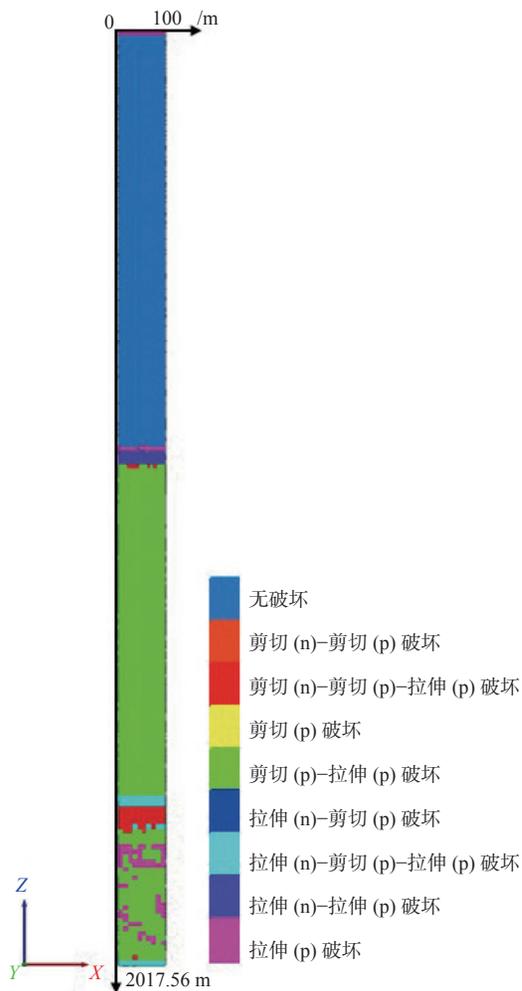


图 12 模型破坏方式模拟分析

Fig. 12 Simulation analysis of model damage patterns

在破坏区域。由图 12 可知,模型的上层围岩约在 0~50.00 m 范围内出现了拉伸破坏,此范围内岩芯呈碎块状、块状,局部呈碎屑状;在 60.00~800.00 m 范围内,模拟基本无塑性区出现,此范围内的岩芯以柱状为主,少量碎块;在 850.00~900.00 m 范围内,模拟同时出现拉伸破坏和剪切破坏,此范围的岩芯质量指标 (RQD) 指标约在 37.84%,岩层较为破碎;在 1680.00~1750.00 m 范围内,模拟主要以剪切破坏为主,其中 1758.26~1819.11 m 范围内剪切破坏与拉伸破坏同时存在,此范围的岩芯呈块状、碎块状。由地层岩体的破坏方式分布特征可见,破坏形式主要以剪切破坏为主导,尤其是在 1500.00 m 以深范围的地层,高应力作用下岩体屈服破坏特征明显。

#### 4 高地应力对深部工程建设的影响

实践表明,深部地层高地应力的存在是诱发矿山安全事故的主要原因之一。通过对比观察三山

岛西岭副井工程勘察孔的岩芯发现,浅部地层地应力水平较低,岩芯较为完整,多以长条状为主,裂隙较少;而随着深度和地应力大小的增加,完整性逐渐降低,存在显著的静置舒张自劣化现象(图 13a),钻探取出的完整岩芯随着静止时间的推移出现显著的风化现象,最常见的是岩芯饼化现象;当深度达到 1500~2000 m 时,高地应力条件下取出的岩芯多以碎块状为主,裂隙极为发育。这说明当地层进入深部以后,地应力大小增加,岩石经过长期的地质活动后更容易超过自身承载能力产生塑性破坏,使深部工程建设面临的工程地质条件更为复杂。

硬岩大变形多发于高地应力条件下的深部工程施工过程中(图 13b),在竖井和巷道的爆破掘进过程中,浅部地层中光面爆破效果良好,而在深部爆破过程中出现了严重的片帮、成巷效果差和超挖现象,同时由于开挖扰动后围岩劣化严重,甚至造成了岩体渗透性变异,加剧了涌水风险可控制难度,这些问题不仅对安全造成较大的威胁,还造成工期延长、成本大幅增加。因此,获取深部地层中地应力状态对深部工程建设至关重要,与此同时,随着深度的增加,岩体劣化、流变等问题的出现也对传统地应力测量方法提出了挑战,在工程实践和测量试验中宜采取应力解除、非弹性应变恢复法 (ASR) 和声发射等多种技术手段,相互印证测量结果准确性,进一步提高深部地应力测量的能力水平。

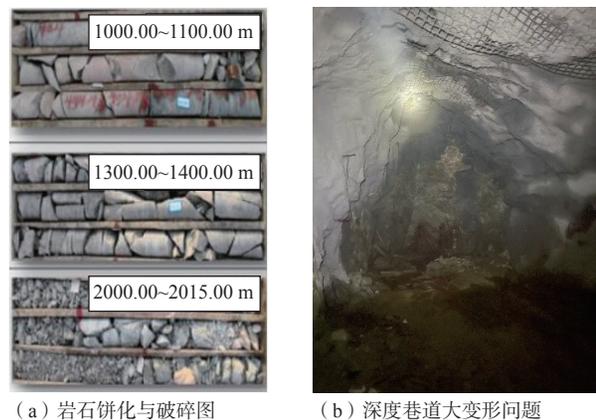


图 13 深部地应力导致的工程灾害图

Fig. 13 Photos of safety issues due to deep in-situ stress

(a) Rock cake-out and fracture; (b) Large deformation in a deep channel

#### 5 结论

(1) 利用三山岛金矿西岭矿区副井 2017.56

m 深勘察孔开展了水压致裂法地应力原位测量, 成功获得了 357.76 m~1899.00 m 深度范围内 23 个测段结果, 实测显示最大水平主应力值为 23.16~70.86 MPa, 最小水平主应力值为 15.24~47.06 MPa, 应力大小随深度近于线性增加, 与中国大陆金属矿区实测地应力变化趋势相一致。3 次印模获得的最大水平主应力方向为 NW55.5°、NW60.4°、NW58.4°, 这与区内主要构造分布密切相关。

(2) 副井工程区应力场主要以水平应力为主导, 1200.00 m 以下铅直主应力( $S_v$ )为中间应力, 最大水平主应力( $S_H$ )与铅直主应力( $S_v$ )比值为 1.30~2.45, 平均为 1.53, 随着深度的增加该值逐渐接近 1.30, 即最大主水平应力逐渐接近铅直主应力。

(3) 采用数值仿真方法, 建立了副井工程区长 100 m×宽 100 m×深 2017.56 m 尺度计算模型, 基于实测地应力值反演分析获得了副井区域内地应力场随深度、地层变化的分布规律, 实测值与反演结果对比显示, 两者基本一致。

(4) 深部地应力原位测量和反演计算分析表明, 2000 m 深度的应力水平在开挖扰动后接近或者超过岩体的屈服强度, 可能诱发围岩破坏失稳问题; 同时, 原岩应力场中最大、最小水平主应力方向为近水平, 且优势明显, 直接影响深部采场布置和巷道走向。因此, 科学准确获得地应力场的大小和方向是深部井巷开拓工程的科学设计与工程风险评估的重要前提。

## References

- AMADEI B, STEPHANSSON O, 1997. Rock stress and its measurement[M]. Dordrecht: Springer: 95, doi: 10.1007/978-94-011-5346-1.
- CAI M F, 1993. Review of principles and methods for rock stress measurement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 12(3): 275-283. (in Chinese with English abstract)
- CAI M F, QIAO L, YU B, et al., 1999. Results and analysis of in-situ stress measurement at deep position of NO. 2 mining area of Jinchuan Nickel Mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 18(4): 414-418. (in Chinese with English abstract)
- CAI M F, 2001. Metal mine design optimization and ground pressure control: theory and practice[M]. Beijing: Science Press: 1-310. (in Chinese)
- CAI M F, CHEN C Z, PENG H, et al., 2006. In-situ stress measurement by hydraulic fracturing technique in deep position of Wanfu coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 25(5): 1069-1074. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Q C, AN M J, LI F Q, 1998. Theoretical discussion on 3-D hydraulic fracturing in situ stress measurement[J]. Journal of Geomechanics, 4(1): 37-44. (in Chinese with English abstract)
- GAI H L, YAO SH H, YANG L P, et al., 2021. Characteristics and causes of coseismic surface rupture triggered by the “5.22”  $M_s$  7.4 earthquake in Maduo, Qinghai, and their significance[J]. Journal of Geomechanics, 27(6): 899-912. (in Chinese with English abstract)
- GALE W J, BLACKWOOD R L, 1987. Stress distributions and rock failure around coal mine roadways[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 24(3): 165-173.
- HE M CH, 2004. Present Situation and Prospect of Rock Mechanics in Deep Mining Engineering[C]//Chinese journal of rock mechanics and engineering. Science Press: 99-105. (in Chinese with English abstract)
- HOU K K, WU Q Z, ZHANG F P, et al., 2022. Application of different in-situ stress test methods in the area of 2 005 m shaft construction of Sanshandao gold mine and distribution law of in-situ stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 43(4): 1093-1102. (in Chinese with English abstract)
- JIA C, 2021. Application of hydraulic fracturing technology in roof with thick and hard sandstone[J]. Jiangxi Coal Science & Technology(2): 116-118, doi: 10.3969/j.issn.1006-2572.2021.02.041. (in Chinese with English abstract)
- LI B, ZHANG W, WEN R, 2022. Study on the hydraulic fracturing in-situ stress measurement in super-long highway tunnels in southern Shaanxi: engineering geological significance[J]. Journal of Geomechanics, 28(2): 191-202. (in Chinese with English abstract)
- LI J W, HE Y, 2021. Analysis and research on in-situ stress measurement based on hydraulic fracturing method[J]. Shanxi Architecture, 47(7): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- LI P, MIAO S J, 2017. Analysis and application of in-situ stress in metal mining area of Chinese mainland[J]. Chinese Journal of Engineering, 39(3): 323-334. (in Chinese with English abstract)
- LI P, GUO Q F, LIU H T, et al., 2017. Characteristics of current in-situ stress field and stress accumulation in Shandong region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 36(9): 2220-2231. (in Chinese with English abstract)
- LI S Q, MA M H, ZHANG X, 2017. In-situ stress distribution regularity of Sanshandao gold mine[J]. Modern Mining, 33(1): 202-205. (in Chinese with English abstract)
- MENG Q, GAO K, CHEN Q Z, et al., 2021. Seismogenic, coseismic and post-seismic deformation and stress evolution of the 2008 Wenchuan earthquake: numerical simulation analysis[J]. Journal of Geomechanics, 27(4): 614-627. (in Chinese with English abstract)
- MENG W, TIAN T, SUN D S, et al., 2022. Research on stress state in deep shale reservoirs based on in-situ stress measurement and rheological model[J]. Journal of Geomechanics, 28(4): 537-549. (in Chinese with English abstract)
- MONTONE P, AMATO A, PONDRELLI S, 1999. Active stress map of Italy[J]. Journal of Geophysical Research, 104(B11): 25595-25610.
- PENG H, MA X M, JIANG J J, et al., 2011. Research on stress field and hydraulic fracturing in-situ stress measurement of 1000 m deep hole in Zhaolou coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 30(8): 1638-1645. (in Chinese with English abstract)
- QIN X H, CHEN Q C, ZHAO X G, et al., 2020. Experimental study on the crucial effect of test system compliance on hydraulic fracturing in-situ stress measurements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 39(6): 1189-1202. (in Chinese with English abstract)
- SHANG X G, ZHU S T, JIANG F X, et al., 2021. Experimental study on the prevention and control of mine earthquake by high pressure water fracturing of huge thick strata in vertical shaft[J]. Journal of China Coal Soci-

- ty, 46(S2): 639-650. (in Chinese with English abstract)
- SU K Z, 1985. Ground stress measurement methods[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- WANG C H, GAO G Y, WANG H, et al., 2020. Integrated determination of principal stress and tensile strength of rock based on the laboratory and field hydraulic fracturing tests[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(2): 167-174. (in Chinese with English abstract)
- WANG L J, PAN L Z, 1991. Earth stress measurements and their application in engineering[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- WANG S J, 2009. Geological Nature of rock and its deduction for rock mechanics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(3): 433-450. (in Chinese with English abstract)
- WU M L, MA Y, LIAO C T, et al., 2008. Study on recent state of stress in depth 1 000 m of Jinchuan mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(S2): 3785-3790. (in Chinese with English abstract)
- YIN J M, ZHOU C H, LI Y A, et al., 2014. Correlation between tunnel stress and regional stress field in North Xinjiang[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 31(11): 42-46. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG C S, WU M L, ZHANG C Y, et al., 2016. Measurement of present-day stress and analysis of stress state in the Changbaishan Mountains of Jilin province[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(3): 922-930. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H, SHI G, WU H, et al., 2020. In-situ stress measurement in the shallow basement of the Shanghai area and its structural geological significance[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(4): 583-594. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y Z, JI H G, ZHANG T Z, et al., 2019-03-26. A hydraulic fracturing ground stress test device protector: CN, 201821495580.6[P]. (in Chinese)
- ZHAO D A, CHEN Z M, CAI X L, et al., 2007. Analysis of distribution rule of geostress in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(6): 1265-1271. (in Chinese with English abstract)
- ZHU H C, TAO Z Y, 1994. State of in-situ stress in different rocks[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 16(1): 49-63. (in Chinese)
- ### 附中文参考文献
- 蔡美峰, 1993. 地应力测量原理和方法的评述[J]. *岩石力学与工程学报*, 12(3): 275-283.
- 蔡美峰, 乔兰, 于波, 等, 1999. 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*, 18(4): 414-418.
- 蔡美峰, 2001. 金属矿山采矿设计优化与地压控制: 理论与实践[M]. 北京: 科学出版社: 1-310.
- 蔡美峰, 陈长臻, 彭华, 等, 2006. 万福煤矿深部水压致裂地应力测量[J]. *岩石力学与工程学报*, 25(5): 1069-1074.
- 陈群策, 安美建, 李方全, 1998. 水压致裂法三维地应力测量的理论探讨[J]. *地质力学学报*, 4(1): 37-44.
- 盖海龙, 姚生海, 杨丽萍, 等, 2021. 青海玛多“5·22” $M_s7.4$ 级地震的同震地表破裂特征、成因及意义[J]. *地质力学学报*, 27(6): 899-912.
- 何满潮, 2004. 深部开采工程岩石力学现状及其展望[C]//第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 成都: 科学出版社: 99-105.
- 侯奎奎, 吴钦正, 张凤鹏, 等, 2022. 不同地应力测试方法在三山岛金矿2 005 m竖井建井区域的应用及其地应力分布规律研究[J]. *岩土力学*, 43(4): 1093-1102.
- 贾晨, 2021. 厚硬砂岩顶板水压致裂技术的应用[J]. *江西煤炭科技* (2): 116-118, doi: 10.3969/j.issn.1006-2572.2021.02.041.
- 李彬, 张文, 文冉, 2022. 陕南特长公路隧道水压致裂法地应力测量结果及工程地质意义分析[J]. *地质力学学报*, 28(2): 191-202.
- 李剑伟, 何勇, 2021. 基于水压致裂法的原地应力测试分析与研究[J]. *山西建筑*, 47(7): 1-5.
- 李鹏, 苗胜军, 2017. 中国大陆金属矿区实测地应力分析及应用[J]. *工程科学学报*, 39(3): 323-334.
- 李鹏, 郭奇峰, 刘洪涛, 等, 2017. 山东地区现今地应力场特征与应力积累水平分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 36(9): 2220-2231.
- 李书强, 马明辉, 张旭, 2017. 三山岛金矿矿区地应力分布特征[J]. *现代矿业*, 33(1): 202-205.
- 孟秋, 高宽, 陈启志, 等, 2021. 2008年汶川大地震孕震、同震及震后变形和应力演化全过程的数值模拟[J]. *地质力学学报*, 27(4): 614-627.
- 孟文, 田涛, 孙东生, 等, 2022. 基于原位地应力测试及流变模型的深部泥页岩储层地应力状态研究[J]. *地质力学学报*, 28(4): 537-549.
- 彭华, 马秀敏, 姜景捷, 等, 2011. 赵楼煤矿1000m深孔水压致裂地应力测量及其应力场研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 30(8): 1638-1645.
- 秦向辉, 陈群策, 赵星光, 等, 2020. 水压致裂地应力测量中系统柔度影响试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 39(6): 1189-1202, doi: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.1204.
- 尚晓光, 朱斯陶, 姜福兴, 等, 2021. 地面直井水压致裂防控巨厚硬岩运动型矿震试验研究[J]. *煤炭学报*, 46(S2): 639-650.
- 苏恺之, 1985. 地应力测量方法[M]. 北京: 地震出版社.
- 王成虎, 高桂云, 王洪, 等, 2020. 利用室内和现场水压致裂试验联合确定地应力与岩石抗拉强度[J]. *地质力学学报*, 26(2): 167-174.
- 王连捷, 潘立宙, 1991. 地应力测量及其在工程中的应用[M]. 北京: 地震出版社.
- 王思敬, 2009. 论岩石的地质本质性及其岩石力学演绎[J]. *岩石力学与工程学报*, 28(3): 433-450.
- 吴满路, 马宇, 廖椿庭, 等, 2008. 金川二矿深部1000m中段地应力测量及应力状态研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 27(S2): 3785-3790.
- 尹健民, 周春华, 李云安, 等, 2014. 北疆深埋隧道地应力与区域应力场相关性研究[J]. *长江科学院院报*, 31(11): 42-46.
- 张春山, 吴满路, 张重远, 等, 2016. 长白山地区现今地应力测量结果与应力状态分析[J]. *地球物理学报*, 59(3): 922-930.
- 张浩, 施刚, 巫虹, 等, 2020. 上海地区浅部地应力测量及其构造地质意义分析[J]. *地质力学学报*, 26(4): 583-594.
- 张月征, 纪洪广, 张同钊, 等, 2019-03-26. 一种水压致裂地应力测试装置保护器: 中国, 201821495580.6[P].
- 赵德安, 陈志敏, 蔡小林, 等, 2007. 中国地应力场分布规律统计分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 26(6): 1265-1271.
- 朱焕春, 陶振宇, 1994. 不同岩石中地应力分布[J]. *地震学报*, 16(1): 49-63.