

引用格式: 陈东升, 纪洪广, 袁永忠, 等, 2023. 岩石非均质程度对水压致裂地应力测试方法影响的分析与讨论 [J]. 地质力学学报, 29 (3): 365–374. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20232906](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20232906)

Citation: CHEN D S, JI H G, YUAN Y Z, et al., 2023. Influence of rock inhomogeneity degree on the crustal stress results measured by hydraulic fracturing method [J]. Journal of Geomechanics, 29 (3): 365–374. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20232906](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20232906)

## 岩石非均质程度对水压致裂地应力测试方法影响的分析与讨论

陈东升<sup>1,2</sup>, 纪洪广<sup>1,2</sup>, 袁永忠<sup>3</sup>, 李芹涛<sup>3</sup>

CHEN Dongsheng<sup>1,2</sup>, JI Hongguang<sup>1,2</sup>, YUAN Yongzhong<sup>3</sup>, LI Qintao<sup>3</sup>

1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083;
2. 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;
3. 莱州汇金矿业投资有限公司, 山东 烟台 261400

1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
3. LaizhouHuijin Mining Investment Co., Ltd., Yantai 261400, Shandong, China

### Influence of rock inhomogeneity degree on the crustal stress results measured by hydraulic fracturing method

**Abstract:** Accurate in-situ crustal stress data are essential for excavation support design and long-term stability analysis of underground projects. We tested the main shaft of the Shaling Gold Mine for crustal stress using hydraulic fracturing technology, and the crustal stress state of 20 measurement points was obtained. The Brazilian test, uniaxial compression test, and acoustic emission test of the cores were conducted indoors to obtain the rock's spatial inhomogeneity and strength distribution. We analyzed the relationship between the inhomogeneity of the rock and the hydraulic fracturing results. The analysis results show that the magnitude of the principal stress increases nearly linearly with the measurement depth, with the maximum horizontal principal stress value ranging from 20.78 to 45.2 MPa and the minimum principal stress value from 14.94 to 35.33 MPa. The average direction of the maximum horizontal principal stress is NW 65°. The inhomogeneity of each layer of the cores varies, and the inhomogeneity coefficient of the metagabbro is from 0.1 to 0.3. The number of acoustic emission signals under each intensity of the rock is basically the same, and the dispersion of the rock is small. The non-homogeneity coefficient of granite is up to 1.0, dominated by the acoustic emission signals generated by the intense-phase rupture at the late loading stage. The non-homogeneity of the rock affects the direction of expansion of the hydraulic fracture, and the angle  $\varphi$  between the expansion direction and the maximum horizontal principal stress affects the measurement results of the horizontal maximum and minimum principal stresses and has a more significant effect on the horizontal minimum principal stress. The relationship between hydraulic fracture measurements and rock properties was analyzed, which is helpful for accurately detecting the distribution of stress fields in inhomogeneous strata.

**Keywords:** deep layers; in-situ stress; hydraulic fracturing; rock inhomogeneity; rock mechanics testing

**摘要:** 准确揭示原位地应力状态, 对地下工程开挖支护设计和长期稳定性分析等具有十分重要的意义。利用水压致裂技术开展了纱岭金矿主竖井地应力测试工作, 获得了 20 个测段地应力状态; 室内进行了主竖井测试孔岩芯的岩石力学试验, 包括巴西劈裂试验、单轴压缩试验及声发射监测试验, 获得了岩

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目 (2019SDZY02, 2019SDYZ05)

This research is financially supported by the Major Scientific and Technological Innovation Projects of Shandong Province, China (Grants 2019SDZY02 and 2019SDYZ05)

第一作者: 陈东升 (1994—), 男, 在读博士, 主要从事岩石力学与地应力测量等相关工作。E-mail: [beikecds@163.com](mailto:beikecds@163.com)

通讯作者: 纪洪广 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学基础理论与岩土工程相关工作。

E-mail: [jihongguang@ces.ustb.edu.cn](mailto:jihongguang@ces.ustb.edu.cn)

收稿日期: 2023-02-28; 修回日期: 2023-04-15; 责任编辑: 范二平

石空间非均质度和强度分布特征,并分析了岩石非均质度与水压致裂测试结果的关系。结果表明:主应力大小随测量深度近似呈线性增大,测试孔的最大水平主应力值为 20.78~45.20 MPa,最小水平主应力值为 14.94~35.33 MPa,平均最大水平主应力方向为 NW65°;测试孔岩芯各层位非均质度不同,变辉长岩非均质度系数为 0.1~0.3,且岩石不同强度条件下声发射信号数量变化不显著,岩石离散度较小,花岗岩非均质度系数最高,可达 1.0,以加载后期强相破裂产生的声发射信号为主;岩石非均质度影响水压致裂裂纹的扩展方向,扩展方向和最大水平主应力方向的夹角 $\varphi$ 影响着最大、最小水平主应力的测量结果,且对最小水平主应力的影响尤为显著。分析水压致裂测量结果与岩石性质之间的关系,对精确探测非均质地层的地应力场分布规律具有一定的指导作用。

**关键词:** 深部地层;原位地应力;水压致裂法;岩石非均质度;岩石力学试验

**中图分类号:** P553 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 03-0365-10

**DOI:** 10.12090/j.issn.1006-6616.20232906

## 0 引言

地下岩体受重力及构造应力的作用,一直处于天然受力状态。地应力作为地球科学和地下工程建设中的一个重要参数,是引起地下开挖工程变形和破坏的根本作用力。准确掌握地应力的赋存状态及其分布特征是地下结构稳定性及长期服役期安全性研究、地下工程开挖与支护系统设计、深部高能脆性岩体岩爆倾向性分析及预测(蔡美峰等, 2013a)、岩石多场耦合下力学行为分析(孟宪波等, 2019)、深部岩体流体流动运输机制研究、裂纹扩展与破裂分析等研究内容的重要基础。

现场地应力测试方法可分为基于钻孔和岩芯测试方法两大类(Ljunggren et al., 2003),包括:水压致裂法(Hubbert and Willis, 1957; 刘建等, 2021)、钻孔崩落法(Bell and Gough, 1979; 陈念等, 2021)、非弹性应变恢复法(ASR; Teufel, 1983; 王连捷等, 2012)、凯瑟效应法(Goodman, 1963; 侯奎奎等, 2022)、空心包体法(Leeman and Hayes, 1966; 蔡美峰等, 2010, 2013b)等。其中,水压致裂法因具有操作简单、适用深部地层等特点而被广泛应用,并成为一项重要的地应力测试技术(Lee and Ong, 2018; 张浩等, 2020; 任洋等, 2021; 吴基文等, 2021; 李彬等, 2022; 张重远等, 2022)。秦向辉等(2020)通过钻孔水力压裂试验分析了系统柔度对地应力测试结果的影响;赵星光等(2014)和包林海等(2017)运用水压致裂法分别获得甘肃北山、成兰铁路工程沿线地应力状态及其分布规律,与区域应力场基本吻合,并分析了工程区内断层的稳定性。

经典水压致裂理论的基本假设:岩体具有不透

水、均质弹性、各向同性等特点(Hubbert and Willis, 1957)。但在实际的地层中,岩石很少是均匀的。因此,基于该假设进行的水压致裂测试,虽能满足地层地应力测量的基本需求,但随着人类探索地下空间与资源深度的增加,深部高应力、高水压、高地温的地层赋存条件和深部地层岩体的异质性更为显著,岩体性质对水压致裂结果的影响不容忽视。大量研究表明:对于花岗岩等异质性结晶岩,其水压致裂行为高度依赖于岩石矿物成分、粒度、强度和空间上的异质性(Chen et al., 2015)。室内压裂试验也已发现岩石晶粒的异质性对裂纹的生长行为具有很大的影响(Zhuang et al., 2022),岩石的非均质性导致水压致裂路径不规则发展(杨天鸿等, 2002; 邱宇超等, 2022),通过真三轴水压致裂试验发现颗粒的几何和空间分布特征控制着水压致裂裂纹的扩展及形态(陈佳亮, 2019)。非均质岩石材料会导致地应力测试结果误差更大(Cai et al., 1995),这给深部地层水压致裂地应力测试技术带来了新的挑战。

文章采用水压致裂法在纱岭金矿主竖井地质勘探孔进行了现场地应力测试,获得了 600~1500 m 地应力状态及其随深度变化规律,并开展了测段岩样的室内巴西劈裂试验、单轴压缩试验和声发射试验,获得了不同深度岩样的非均质度,进一步探讨了岩石非均质度对水压致裂数据与实际值关系的影响,可为深部非均质地层水压致裂地应力测试技术的发展提供一定的参考。

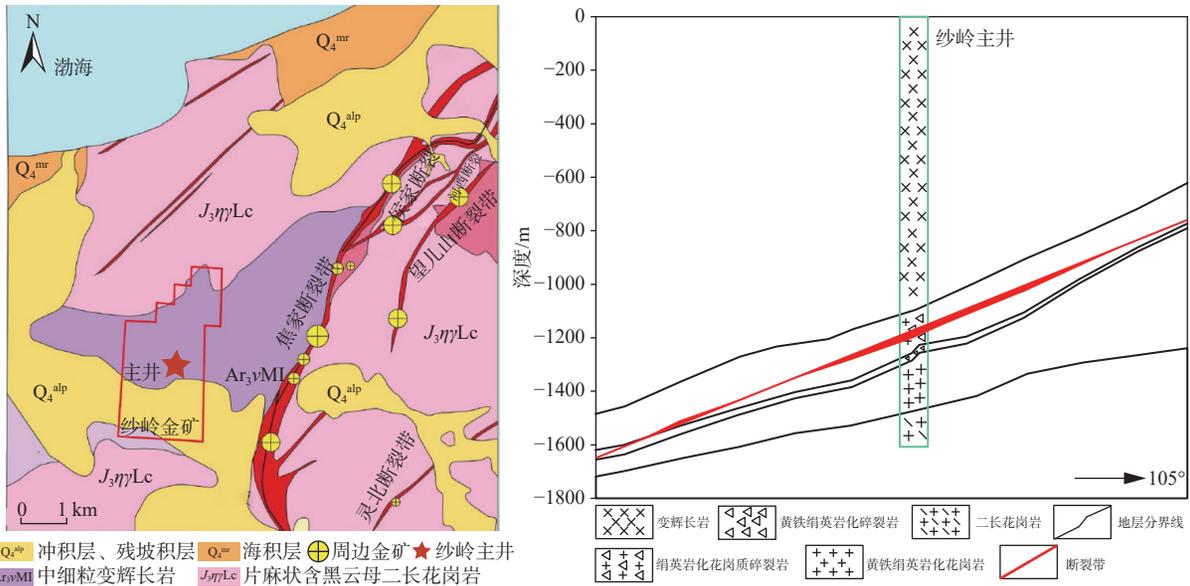
## 1 研究区地质构造概况

纱岭金矿主竖井位于山东省莱州市,其建井工

程区域大地构造环境复杂, 正处在华北陆块胶辽隆起的胶北-胶莱断隆区西北部, 其西邻沂沭断裂带(Ⅱ级), 东靠与金矿成矿有密切关系的新元古代玲珑超单元侵入岩。纱岭金矿及其临近区域内构造以断裂发育为主, 按其展布方向的差异将其分为北东向和近南北向两组, 其中北东向断裂最为发育, 包括焦家断裂带、望儿山断裂带、灵北断裂带等, 且规模最大的为焦家断裂带(图 1a; 姜梦瑶, 2019)。

纱岭金矿主竖井井筒净直径为 6.8 m, 深度达

到 1551.8 m, 且井筒穿越焦家主断裂带。主竖井浅部地层岩性主要为变辉长岩(-50~-1090 m), 位于焦家断裂带上盘。随着井筒深度增加, 井筒穿越的地层岩性复杂程度也随之增加, 主要揭露的岩性依次为绢英岩化花岗质碎裂岩(-1090~-1233 m)、黄铁绢英岩化碎裂岩(-1233~-1250 m)、黄铁绢英岩化花岗岩(-1250~-1477m)、二长花岗岩(-1477~-1602 m)等(图 1b)。



(a) 纱岭金矿及周边区域地质构造简图 (姜梦瑶, 2019) (b) 主井地质剖面图简图

图 1 纱岭金矿区域地质构造简图与主井地质剖面图简图

Fig. 1 Sketch map of the regional geological structure and the geological profile of the main shaft of the Shaling Gold Mine

## 2 水压致裂法原位地应力测量

### 2.1 水压致裂法地应力测量原理

水压致裂法有 3 个前提假设: ①岩石是均质、各向同性的弹性体; ②岩石的完整性和对于压裂液的非渗透性; ③其中 1 个主应力( $\sigma_v$ )方向与铅直钻孔轴向平行, 其大小与上覆岩体重力相同。为满足水压致裂法的前提假设②, 选择岩体完整性较好的地层进行测试, 测试过程中监测裂纹开裂时的破裂压力( $P_b$ ), 关泵时裂纹闭合临界状态时的瞬时压力( $P_s$ ), 再次注水加压使得裂纹重新张开时的重张压力( $P_r$ ), 此时考虑岩体内部的孔隙压力( $P_0$ ), 3 个主应力 $\sigma_H$ 、 $\sigma_h$ 、 $\sigma_v$ 的大小可以通过公式(1)获得。水压致裂测试结束后采用印模定向方法确定水平主应力的方向。其中, 压裂的竖裂缝方向为最大水平主

应力( $\sigma_H$ )的方向, 最小水平主应力( $\sigma_h$ )方向与之基本垂直。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_H &= 3P_s - P_r - P_0 \\ \sigma_h &= P_s \\ \sigma_v &= \gamma H \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_H$ —最大水平主应力;  $\sigma_h$ —最小水平主应力;  $\sigma_v$ —垂直主应力;  $P_s$ —裂纹闭合瞬时压力;  $P_r$ —裂纹重张压力;  $P_0$ —孔隙压力;  $\gamma$ —上覆岩体的容重;  $H$ —测段相对孔口的深度。

### 2.2 地应力测量结果

采用上述水压致裂方法, 在纱岭金矿主井勘探孔开展了 20 个测段地应力测量工作, 获得了压裂曲线(图 2)。由图 2 可知, 破裂后再次压裂的曲线具有较强的可重复性,  $P_s$ 、 $P_r$ 具有较好的一致性, 验证了测量结果的可靠性。分别选定了钻孔压裂峰值非常明显的 2 个测段(-950.08 m 和 -1340.02 m)进行

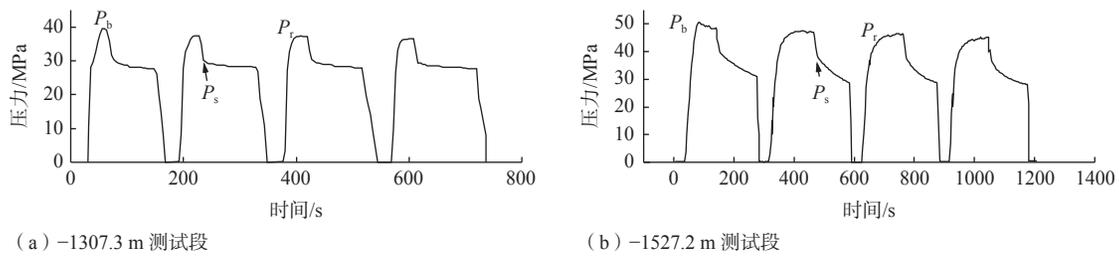


图2 水压致裂典型压裂曲线

Fig. 2 Typical fracturing curves of hydraulic fracturing

了印模定向, 获得了最大水平主应力方向为NW66.2°和NW63.8°, 平均为NW65°。根据各测段的压力曲线, 通过公式(1)计算3个主应力大小。其中, 最大水平主应力值为20.78~45.20 MPa, 最小主应力值为14.94~35.33 MPa(表1)。

从图3中可以看出, 水平主应力随深度变化趋势为近似线性增加, 最大水平主应力在990 m处突然增大, 而后至1160 m处基本保持不变, 表明990~1160 m范围内存在地应力异常, 可能与纱岭矿区焦家断裂带展布特征有关。采用插值拟合技术, 获得主竖井勘探孔的主应力大小随深度的变化

关系如下(上覆岩体的容重取值为0.027 N/cm<sup>3</sup>):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_H &= 0.028H + 3.777 \\ \sigma_h &= 0.025H + 0.073 \\ \sigma_v &= 0.027H \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

### 3 岩石非均质度测试

#### 3.1 非均质度测试方法

水压致裂法将岩石材料假设成均质弹性体, 没有考虑岩石的变形行为。但岩石作为一种天然的地质材料, 受成岩过程中的不同地质条件影响, 其内部细观结构存在差异性, 多数岩石表现为非均质

表1 水压致裂地应力测量结果

Table 1 In-situ stress measurement results using hydraulic fracturing

测段深度/m	压裂参数/MPa					主应力值/MPa			破裂方位
	$P_b$	$P_r$	$P_s$	$P_0$	$T$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_v$	
-632.00	21.05	17.85	14.94	6.19	3.20	20.78	14.94	16.72	—
-700.00	21.19	16.71	15.33	6.86	4.48	22.42	15.33	18.52	—
-757.54	16.93	15.86	15.58	7.42	1.07	23.46	15.58	20.04	—
-789.00	21.64	16.98	16.52	7.73	4.66	24.85	16.52	20.88	—
-814.75	23.22	18.19	17.27	7.98	5.03	25.64	17.27	21.56	—
-856.20	24.24	18.71	18.12	8.39	5.53	27.26	18.12	22.66	—
-900.00	26.47	20.58	19.46	8.82	5.89	28.98	19.46	23.81	—
-950.08	28.94	23.20	21.34	9.31	5.74	31.51	21.34	25.14	NW66.2°
-993.00	30.67	26.26	23.48	9.73	4.41	34.45	23.48	26.27	—
-1071.62	35.23	29.00	24.83	10.50	6.23	34.99	24.83	28.36	—
-1119.00	37.11	30.10	25.31	10.97	7.01	34.86	25.31	29.61	—
-1160.27	38.68	32.16	26.06	11.37	6.52	34.65	26.06	30.70	—
-1236.14	34.82	33.74	27.21	12.11	1.08	35.78	27.21	32.71	—
-1307.30	39.85	36.91	28.95	12.81	2.94	37.13	28.95	34.59	—
-1340.02	46.22	38.03	29.87	13.13	8.19	38.45	29.87	35.46	NW63.8°
-1355.00	44.85	38.80	30.63	13.28	6.05	39.81	30.63	35.85	—
-1417.68	47.26	41.91	32.72	13.89	5.35	42.36	32.72	37.51	—
-1435.90	52.10	43.65	33.58	14.07	8.45	43.02	33.58	37.99	—
-1483.00	47.77	45.71	34.96	14.53	2.06	44.64	34.96	39.24	—
-1527.15	51.41	45.82	35.33	14.97	5.59	45.20	35.33	40.41	—

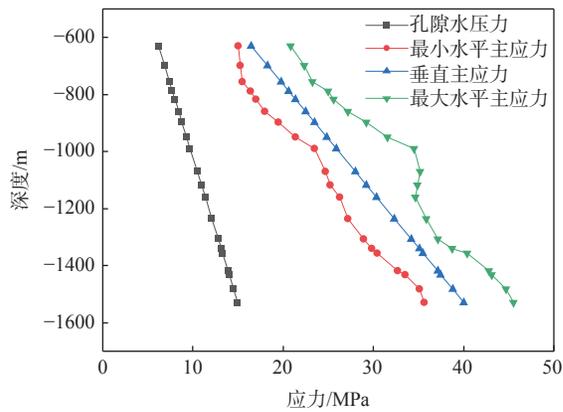


图3 主应力、孔隙水压力随深度变化规律

Fig. 3 Distribution of principal stress and pore water pressure with depth

体。因此,在破裂过程中,往往会表现出不同的力学性能和破坏形式。在进行现场水压致裂测试时,岩石的非均质特性对水压致裂测试结果的准确性也带来了一定的影响,如非均质岩石裂纹方向并非沿主应力方向扩展,导致应力场的偏转。岩石材料内部强度差异性致使其局部应力在大小和方向上产生突变,就造成了地应力测量结果的误差。

定量表征岩石材料的非均质性,首先要明确其材料组分强度上的差异性及各强度占比、各组分材料空间上的变异性两方面内容。岩石破裂时产生的声发射信号(AE)能够反映该应力环境中岩石强度相的破裂特征。基于此,Zhang et al.(2022)按应力大小将岩石受载破裂过程等分成*i*个阶段,统计分析各阶段的声发射事件数量,定义了岩石的强弱占比*F*,并由此识别岩石内部强弱相所占比例的大小。为了识别岩石空间上的变异性,苏晓波等(2020)测定了巴西劈裂中轴线位置应变的差异,定义了岩石材料组构非均质性的变异系数( $C_V$ ):

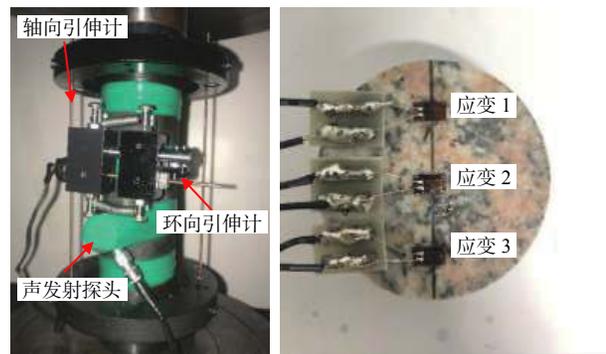
$$C_V = \sigma/m \times 100\% \quad (3)$$

式中: $\sigma$ 、 $m$ —巴西劈裂中轴线各位置应变的标准差和均值。

### 3.2 岩石非均质度测试方案

采用岩石的强弱占比(*F*)和岩石材料组构非均质性的变异系数( $C_V$ )两种方法来表征主竖井勘探孔岩石的非均质程度。该勘探孔主要岩性为变辉长岩和花岗岩,选取完整岩芯将其加工成劈裂试验的圆盘试件(直径为50 mm、高为25 mm)和单轴加载试验的标准圆柱试件(直径为50 mm、高为100 mm)。如图4a所示,选用GAW2000单轴试验机对圆柱试件进行单轴加载,采用引伸计记录加载过

程中的轴向和环向应变,采用PCI-2声发射采集系统对试验过程中的声发射信号进行实时监测。为了避免环境噪音的影响,声发射采集阈值设置为40 dB。试验过程采取位移控制的加载方式,加载速率为0.01 mm/min,加载系统与声发射监测系统同时启动,直至岩石破裂。如图4b所示,对于劈裂试验,每组试件采用沿对称轴布置的3组应变片来监测圆盘试件的横向应变,加载过程采用荷载控制,加载速率为100 N/s,直至圆盘试件劈裂为两部分时,试验结束。



(a) 单轴岩样安装示意图 (b) 应变片布置图

图4 单轴试件安装及劈裂试件应变片布置图

Fig. 4 Uniaxial rock sample installation and splitting specimen strain gauge layout drawing

### 3.3 岩石非均质度测试结果分析

对于巴西劈裂试验,除轴线端部出现应力集中外,其余位置所受拉应力大小近乎一致。此时,试件上轴向3处应变片变形的差异,能够反映出沿轴线不同位置岩石组分变形能力的差异性,并得到巴西劈裂应变随时间变化曲线(图5)以及由公式(3)计算出的变异系数( $C_V$ )。对于-913 m的变辉长岩,其应变1较其他2组有所差异,表征非均质度的变异系数处于0.2~0.6区间,且劈裂破坏时最高可达到0.5~0.6(图5a),变异系数取值相对较低,表明变形的离散程度相对较小,岩石的非均质度较小;对于-1058 m的变辉长岩,轴向3处应变差异性较小,变异系数维持在0.1~0.3(图5b),劈裂开始50 s至劈裂破坏前,变异系数始终维持在0.2附近,轴向各处应变差异性较小,各区域变形更为协调,岩石的非均质度最小;对于-1553 m的花岗岩,随着加载过程的进行和劈裂应力的增大,应变1较其余2组变形不协调,变异系数较大,且最高可达1.0(图5c),岩石非均质度最高。

限于篇幅,将单轴压缩试验中的部分花岗岩和

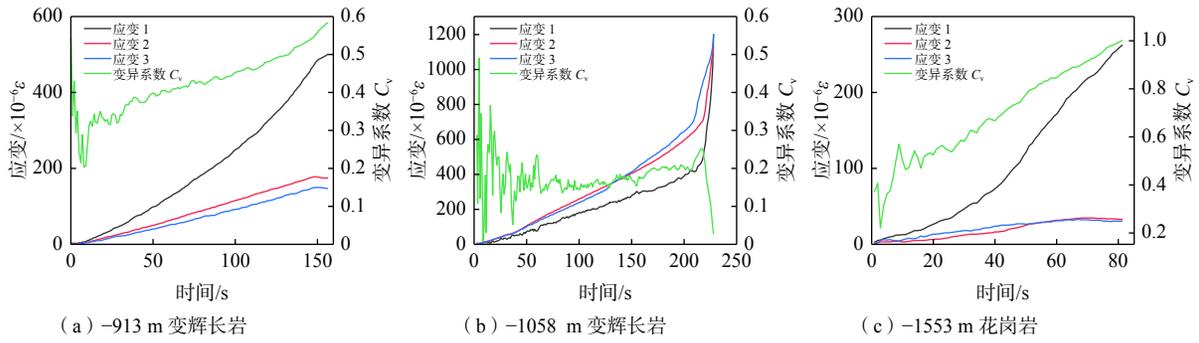


图 5 不同深度岩石的劈裂应变及变异系数  
Fig. 5 Splitting strains and coefficients of variation for rocks at different depths

变辉长岩的应力-时间曲线及声发射幅值绘制于图 6a—6c, 将加载过程按应力大小等分成 10 个阶段, 统计每个阶段的声发射事件数量和占整个加载过程总量的比例, 绘制于图 6d—6f。-1058 m 的变辉长岩在加载前期的声发射事件数目占比明显高于其他 2 个层位的岩石, 表明其内部弱相结构比例较大, 且加载各阶段的声发射信号占比相对较为均匀, 即表明各个强度下破裂相的比例较为接近, 在整个加载过程各阶段, 各强度相在渐进地破坏。对于-1553 m 的花岗岩, 其声发射信号集中在加载阶段的后期, 表明该岩石材料强度的分布较为集中且主要以后期的强相破裂为主。因此验证了通过声发射信号的占比, 能够获得岩石材料强度分布的非均质性; 通过变形的离散性, 能够获得各强度相

空间上变形非均质度的可行性。

#### 4 非均质性对水压致裂测试结果影响的分析与探讨

##### 4.1 非均质性对水压致裂测试结果的影响分析

岩石的非均质性对水压致裂测试精度的影响为以下误差叠加的结果。一方面, 勘探孔周边岩体空间上非均质性致使沿孔径各方向上岩体(岩石)强度并不相同, 造成压裂裂缝可能沿着薄弱方向而非沿着平行于最大水平主应力方向扩展, 进而引起最大水平主应力方向偏差和大小的误差; 另一方面, 岩石结构强度的大小与地应力的关系、岩石各强度相的所占比例等对水压致裂测试误差的影响

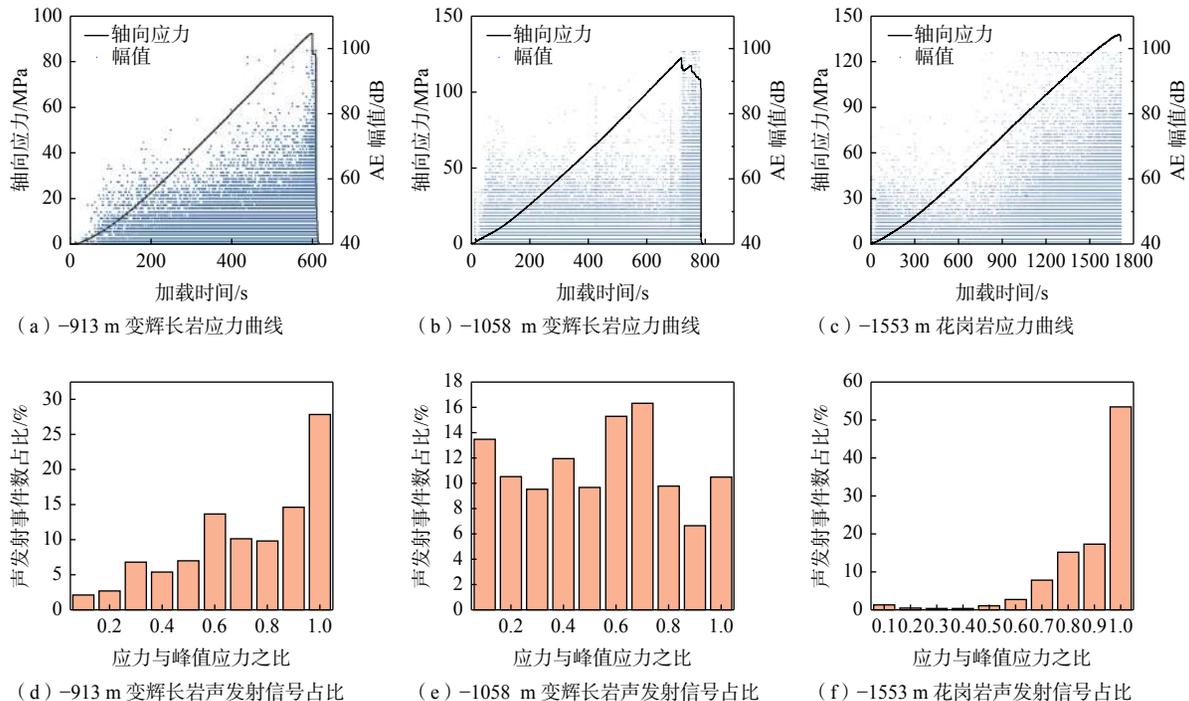


图 6 岩样应力-应变曲线、声发射幅值演化及各应力下声发射信号占比

Fig. 6 Stress-strain curves of rock samples, evolution of acoustic emission amplitude, and percentage of acoustic emission signal at each stress

也不容忽视。

钻孔周围岩体所受拉应力和注水压力的关系可表示为:

$$T_\varphi = P - (\sigma_H + \sigma_h) + 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\varphi \quad (4)$$

式中:  $P$ —注水压力;  $\varphi$ —岩体和测试孔中心连线与最大水平主应力方向的夹角;  $T_\varphi$ —夹角  $\varphi$  处的岩体所受拉应力; 其他变量同上。

如图 7 所示, 假设水压致裂钻孔周围岩体随机分布抗拉强度为  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $\dots$ 、 $T_n$  的相, 各相与测试孔中心连线与最大水平主应力方向的夹角分别为  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $\dots$ 、 $\varphi_n$ 。不考虑孔隙水压力时, 水压致裂过程中各相临界拉破裂时的注水压力 ( $P_i$ ) 为:

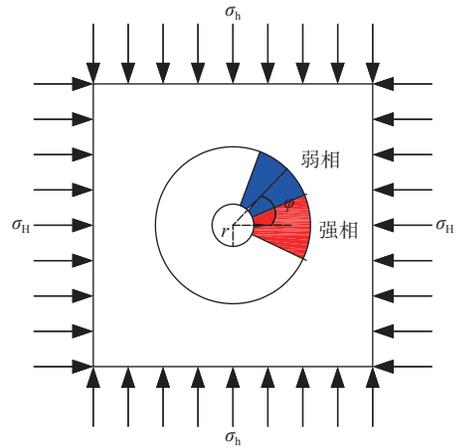
$$P_i = (\sigma_H + \sigma_h) - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\varphi_i + T_i \quad (5)$$

式中:  $\varphi_i$ —第  $i$  相 ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) 与最大水平主应力方向的夹角;  $T_i$ —第  $i$  相的抗拉强度;  $P_i$ —第  $i$  相拉破裂时的注水压力。

若岩石为均质材料, 即  $T_i = T_j (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 。当  $\varphi = 0$  时, 破裂时的注水压力  $P$  最小, 即为传统的水压致裂算法。若岩石为非均质材料, 即  $T_i \neq T_j (i, j = 1, 2, \dots, n; \text{且 } i \neq j)$  时, 随着  $P$  的增加, 当  $T_\varphi$  达到岩石材料某一相极限抗拉强度  $T_i$  时, 此时的  $P_i$  为这一相破裂时的最小注水压力, 且破裂裂纹的方向与最大水平主应力方向夹角  $\varphi$  为该相与最大水平主应力方向的夹角  $\varphi_i$ , 水压致裂裂纹也即沿该方向扩展。显而易见, 岩石非均质度的增加, 导致各相强度离散性增大, 不同强度相在空间位置上的分布更不均匀, 更易导致破裂面与最大水平主应力方向夹角  $\varphi$  的增大。

#### 4.2 非均质性对水压致裂测试结果的精度探讨

下面探究破裂面与最大水平主应力方向夹角



$\sigma_H$ 、 $\sigma_h$ —最大、最小水平主应力;  $\varphi$ —岩体和测试孔中心连线与最大水平主应力方向的夹角;  $r$ —测试孔半径

图 7 水压致裂岩石强弱相分布示意图

Fig. 7 Schematic diagram showing the strong and weak phase distribution of rocks using hydraulic fracturing

$\sigma_H$  and  $\sigma_h$ —maximum and minimum horizontal principal stresses;  $\varphi$ —angle between the connecting line of the center of the rock and the test borehole and the direction of the maximum horizontal principal stress;  $r$ —radius of the test borehole

$\varphi$  的大小对水压致裂测量结果精度的影响。原位状态下水压致裂钻孔远场应力状态如图 8(a) 所示, 为方便计算, 建立远场应力坐标系  $x'oy'$  和与  $x'oy'$  夹角为  $\varphi$  的转化坐标系  $xoy$ , 如图 8b 所示, 则根据弹性力学中的应力分量转化,  $xoy$  坐标系中岩体的应力状态可表示为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_H \cos^2 \varphi + \sigma_h \sin^2 \varphi \\ \sigma_y &= \sigma_h \cos^2 \varphi + \sigma_H \sin^2 \varphi \\ \tau_{xy} &= (\sigma_H - \sigma_h) \sin \varphi \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

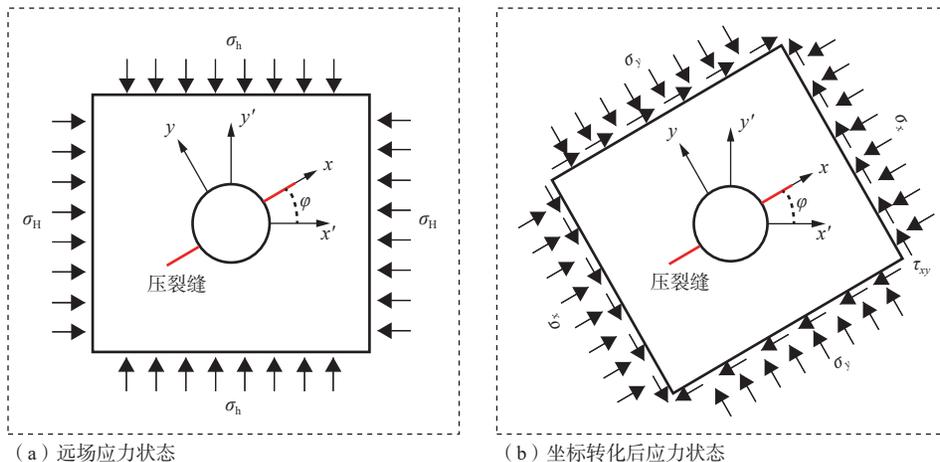


图 8 水压致裂远场应力状态和坐标转化后应力状态

Fig. 8 The far-field stress state and the stress state after coordinate transformation using hydraulic fracturing

式中:  $\sigma_x$ — $x$ 方向上的正应力;  $\sigma_y$ — $y$ 方向上的正应力;  $\tau_{xy}$ —切应力; 其他变量同上。

此时, 若不考虑切应力对水压致裂测试中裂纹张开与闭合的影响, 则有:

$$\left. \begin{aligned} P_s &= \sigma_y \\ P_r &= 3\sigma_y - \sigma_x - P_0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

联立公式(6)、公式(7), 裂纹闭合时的瞬时压力( $P_s$ )和裂纹重新张开时的重张压力( $P_r$ )可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} P_s &= \sigma_h \cos^2 \varphi + \sigma_H \sin^2 \varphi \\ P_r &= (\sigma_H + \sigma_h) - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\varphi - P_0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

因此, 考虑破裂面与最大水平主应力方向夹角为 $\varphi$ 时的水平主应力大小为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_H &= \frac{(1 + 2\cos 2\varphi)P_s - \cos^2 \varphi(P_r + P_0)}{\sin^2 \varphi(1 + 2\cos 2\varphi) - \cos^2 \varphi(1 - 2\cos 2\varphi)} \\ \sigma_h &= \frac{\sin^2 \varphi(P_r + P_0) - (1 - 2\cos 2\varphi)P_s}{\sin^2 \varphi(1 + 2\cos 2\varphi) - \cos^2 \varphi(1 - 2\cos 2\varphi)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

以-1307.3 m测段为例,  $P_s$ 、 $P_r$ 、 $P_0$ 取值见表1, 通过公式(1)、公式(9)分析不同的 $\varphi$ 条件下传统水压致裂法测量结果与原位地应力之间的差异性。 $\varphi$ 为 $0^\circ \sim 45^\circ$ 时, 该地层按传统水压致裂法测得的最大水平主应力较真实值偏大, 且误差随着 $\varphi$ 的增大而逐渐增大; 对于考虑 $\varphi$ 的最小水平主应力, 其随着 $\varphi$ 值的增大先增大后减小, 且在 $\varphi$ 取值较小时, 与最大水平主应力变化趋势相比, 随着 $\varphi$ 的扰动, 传统水压致裂法测得最小水平主应力与考虑 $\varphi$ 的最小水平主应力的差值更大, 较小的 $\varphi$ 值引起较大的最小水平主应力测量误差, 而 $\varphi$ 值的大小与所测区域的均质状态有关(图9)。因此, 对于非均质程度较高的

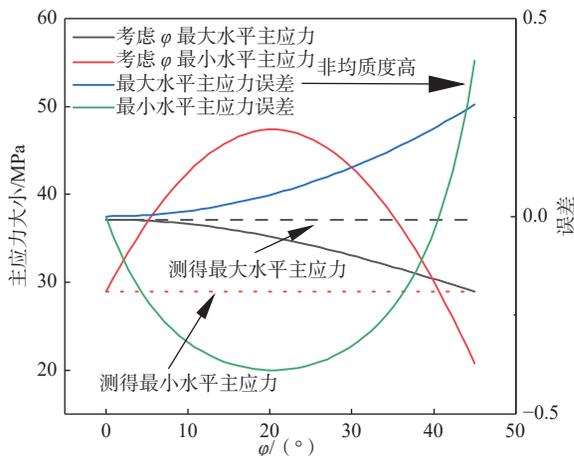


图9 水压致裂测得水平主应力及误差与 $\varphi$ 关系变化图

Fig. 9 Plot of horizontal principal stress and error measured by hydraulic fracturing versus  $\varphi$

地层岩石, 在进行水压致裂地应力测试时, 要着重考虑岩石的非均质性对最小水平主应力测量精度的影响。

此外, 水压致裂时的重张压力( $P_r$ )不仅由裂纹周围的应力场决定, 还与岩石本身的断裂韧度( $K_{IC}$ )相关(刘跃东等, 2018), 而岩石的断裂韧度可以通过单轴抗拉强度进行预测(Zhang, 2002; Cai et al., 2004)。因此, 水压致裂测量结果的准确性也与岩石材料强度的大小及其分布特征息息相关。且岩石的非均质性与相同尺度下岩石强度和变形参数不匹配, 非均质体附近的应力扰动引起局部结构应力, 导致应力的大小和方向上有较大的变化。近场与远场地应力的差异使水压致裂法测得的地应力状态, 并不能真实反映全局应力系统的状态, 这一点需在非均质性较高的地层中进行水压致裂地应力测量时得到重视。

## 5 结论

(1)为了准确获得纱岭金矿主竖井区深部地层地应力状态, 采用传统水压致裂法开展了主竖井勘探孔现场地应力测量工作, 揭示了地应力状态及其随深度的变化规律。其中, 最大水平主应力值为20.78~45.20 MPa, 最小主应力值为14.94~35.33 MPa, 且主应力大小随深度的增加基本上呈线性增大, 最大水平主应力平均方向为NW65°, 上述测试结果可为矿区主竖井规划建设和安全设计提供重要的科学依据。

(2)对勘探孔揭露的变辉长岩和花岗岩试件, 开展了单轴加载试验、声发射试验和巴西劈裂试验。劈裂试验变形的离散性, 确定了岩样试件的变形非均质度; 单轴试验中声发射信号的分布规律, 获得了岩样试件的强度分布特征。结果表明: 劈裂试验中花岗岩的变形非均质度较变辉长岩更大, 非均质度系数更高; 单轴试验中变辉长岩较花岗岩在加载各阶段AE事件数占比变化不明显, 岩石离散度更小。基于上述结果, 实现了纱岭金矿主竖井揭露地层岩石的非均质性评价。

(3)获得了岩石的非均质性对水压致裂地应力测试结果的影响程度。对于考虑 $\varphi$ 的最大水平主应力, 当 $\varphi$ 为 $0^\circ \sim 45^\circ$ 时, 传统水压致裂法测得的最大水平主应力较真实值偏大, 且误差随着 $\varphi$ 值的增大而逐渐增大; 对于考虑 $\varphi$ 的最小水平主应力, 当 $\varphi$ 取值较小时( $45^\circ$ 以内), 其随着 $\varphi$ 值的增大先增大后减

小,传统水压致裂法测得最小水平主应力值大多数情况下较考虑 $\varphi$ 值的最小水平主应力值偏小,且较小的 $\varphi$ 值引起较大的最小水平主应力测量误差。同时,推导出破裂面与最大水平主应力夹角( $\varphi$ )的水压致裂法测量的水平主应力公式。

传统的水压致裂法地应力测量时,将岩石假设成各向均质的弹性体,而实际地层中岩石多为非均质体。因此,文章提出了在实际水压致裂地应力测量时,要充分考虑研究区岩石的非均质特性对结果的影响。实际水压致裂法地应力测试工作中,地层的非均质特性评价及其对地应力测量结果影响机制和影响程度的定量性分析,还需结合理论在试验中进一步佐证,以推进在非均质地层中水压致裂地应力测量技术的发展和应。

## References

- BAO L H, DU Y, GUO Q L, et al., 2017. In-situ stress measurement and research on tectonic stress field distribution law of Chengdu-Lanzhou railway[J]. *Journal of Geomechanics*, 23(5): 734-742. (in Chinese with English abstract)
- BELL J S, GOUGH D I, 1979. Northeast-southwest compressive stress in Alberta evidence from oil wells[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 45(2): 475-482.
- CAI M, QIAO L, YU J, 1995. Study and tests of techniques for increasing overcoring stress measurement accuracy[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 32(4): 375-384.
- CAI M, KAISER P K, TASAKA Y, et al., 2004. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(5): 833-847.
- CAI M F, LIU W D, LI Y, 2010. In-situ stress measurement at deep position of Linglong gold mine and distribution law of in-situ stress field in mine area[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(2): 227-233. (in Chinese with English abstract)
- CAI M F, JI D, GUO Q F, 2013a. Study of rockburst prediction based on in-situ stress measurement and theory of energy accumulation caused by mining disturbance[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 32(10): 1973-1980. (in Chinese with English abstract)
- CAI M F, GUO Q F, LI Y, et al., 2013b. *In situ* stress measurement and its application in the 10th Mine of Pingdingshan Coal Group[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 35(11): 1399-1406. (in Chinese with English abstract)
- CHEN J L, 2019. Numerical simulation methods and experimental investigation of the hydraulic fracturing of heterogeneous Glutenites[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- CHEN N, WANG C H, GAO G Y, et al., 2021. Characteristics of in-situ stress field in the powerhouse area on the right bank of Baihetan based on stress polygon and borehole breakout method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 42(12): 3376-3384. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Y Q, NAGAYA Y, ISHIDA T, 2015. Observations of fractures induced by hydraulic fracturing in anisotropic granite[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(4): 1455-1461.
- GOODMAN R E, 1963. Subaudible noise during compression of rocks[J]. *GSA Bulletin*, 74(4): 487-490.
- 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)
- HUBBERT M K, WILLIS D G, 1957. Mechanics of hydraulic fracturing[J]. *Petroleum Transactions*, 210(1): 153-168.
- JIANG M Y, 2019. Metallogenesis and tectonic setting analysis of Shaling gold deposit in Jiaodong[D]. Hebei GEO University. (in Chinese with English abstract)
- LEE H, ONG S H, 2018. Estimation of in situ stresses with hydro-fracturing tests and a statistical method[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(3): 779-799.
- LEEMAN E R, HAYES D J, 1966. A technique for determining the complete state of stress in rock using a single borehole[C]//Proceedings 1st congress international society of rock mechanics. Lisbon: 17-24.
- 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)
- LIU J, HUI C, FAN J M, et al., 2021. Distribution characteristics of the present-day in-situ stress in the Chang 6 tight sandstone reservoirs of the Yanchang Formation in the Heshui Area, Ordos Basin, China and suggestions for development[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(1): 31-39. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y D, LIN J, FENG Y J, et al., 2018. Research on tensile strength of rock based on hydraulic fracturing method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 39(5): 1781-1788. (in Chinese with English abstract)
- LJUNGGREN C, CHANG Y T, JANSON T, et al., 2003. An overview of rock stress measurement methods[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7-8): 975-989.
- MENG X B, XU Y D, ZHANG Y J, et al., 2019. Study on the variation law of crustal stress field in tight reservoir under multi field coupling[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(4): 467-474. (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)
- QIU Y C, LIANG W G, LI J, et al., 2022. Study on fracture morphology of hydraulic fracturing in heterogeneous elastoplastic coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 47(10): 3668-3679. (in Chinese with English abstract)
- REN Y, WANG D, LI T B, et al., 2021. In-situ geostress characteristics and engineering effect in Ya'an—Xinduqiao section of Sichuan—Tibet Rail-

- way[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 40(1): 65-76. (in Chinese with English abstract)
- SU X B, JI H G, QUAN D L, et al., 2020. Relationship between spatial variability of rock strain and  $b$  value under splitting condition[J]. Journal of China Coal Society, 45(S1): 239-246. (in Chinese with English abstract)
- TEUFEL L W, 1983. Determination of in-situ stress from anelastic strain recovery measurements of oriented core[C]//Symposium on low permeability gas reservoirs. Denver, Colorado: 421-430.
- WANG L J, SUN D S, LIN W R, et al., 2012. Anelastic strain recovery method to determine in-situ stress and application example[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(5): 1674-1681. (in Chinese with English abstract)
- WU J W, ZHANG W Y, PENG H, et al., 2021. In-situ stress measurement by hydraulic fracturing method around Panji coal mine exploration area in Huainan coalfield[J]. Journal of Engineering Geology, 29(4): 972-984. (in Chinese with English abstract)
- YANG T H, TAN G H, TANG C A, et al., 2002. Influence of heterogeneity on hydraulic fracturing in rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 24(6): 724-728. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG C Y, DU S H, HE M C, et al., 2022. Characteristics of in-situ stresses on the western margin of the eastern Himalayan syntaxis and its influence on stability of tunnel surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 41(5): 954-968. (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 T Z, JI H G, SU X B, et al., 2022. Evaluation and classification of rock heterogeneity based on acoustic emission detection[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 29(12): 2117-2125.
- ZHANG Z X, 2002. An empirical relation between mode I fracture toughness and the tensile strength of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39(3): 401-406.
- ZHAO X G, WANG J, MA L K, et al., 2014. Distribution characteristics of geostress field in Xinchang rock block of candidate Beishan area for high level radioactive waste repository in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 33(S2): 3750-3759. (in Chinese with English abstract)
- ZHUANG L, ZANG A, JUNG S, 2022. Grain-scale analysis of fracture paths from high-cycle hydraulic fatigue experiments in granites and sandstone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 157: 105177.
- 附中文参考文献**
- 包林海, 杜义, 郭啟良, 等, 2017. 成兰铁路地应力测量与构造应力场分布规律研究[J]. 地质力学学报, 23(5): 734-742.
- 蔡美峰, 刘卫东, 李远, 2010. 玲珑金矿深部地应力测量及矿区应力场分布规律[J]. 岩石力学与工程学报, 29(2): 227-233.
- 蔡美峰, 冀东, 郭奇峰, 2013a. 基于地应力现场实测与开采扰动能量积聚理论的岩爆预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 32(10): 1973-1980.
- 蔡美峰, 郭奇峰, 李远, 等, 2013b. 平煤十矿地应力测量及其应用[J]. 北京科技大学学报, 35(11): 1399-1406.
- 陈佳亮, 2019. 非均质砂砾岩水压致裂的数值模拟方法与实验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京).
- 陈念, 王成虎, 高桂云, 等, 2021. 基于应力多边形与钻孔崩落的白鹤滩右岸厂房区地应力场特征研究[J]. 岩土力学, 42(12): 3376-3384.
- 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.
- 姜梦瑶, 2019. 胶东纱岭金矿床成矿机制及构造背景分析[D]. 河北地质大学.
- 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.
- 刘建, 惠晨, 樊建明, 等, 2021. 鄂尔多斯盆地合水地区区长 6 致密砂岩储层现今地应力分布特征及其开发建议[J]. 地质力学学报, 27(1): 31-39.
- 刘跃东, 林健, 冯彦军, 等, 2018. 基于水压致裂法的岩石抗拉强度研究[J]. 岩土力学, 39(5): 1781-1788.
- 孟宪波, 徐佑德, 张曰静, 等, 2019. 多场耦合作用下致密储层地应力场变化规律研究: 以准噶尔盆地某区为例[J]. 地质力学学报, 25(4): 467-474.
- 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.
- 邱宇超, 梁卫国, 李静, 等, 2022. 非均质弹塑性煤体水压致裂裂纹形态研究[J]. 煤炭学报, 47(10): 3668-3679.
- 任洋, 王栋, 李天斌, 等, 2021. 川藏铁路雅安至新都桥段地应力特征及工程效应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 40(1): 65-76.
- 苏晓波, 纪洪广, 权道路, 等, 2020. 劈裂条件下岩石应变空间变异性与  $b$  值关系[J]. 煤炭学报, 45(S1): 239-246.
- 王连捷, 孙东生, 林为人, 等, 2012. 地应力测量的非弹性应变恢复法及应用实例[J]. 地球物理学报, 55(5): 1674-1681.
- 吴基文, 张文永, 彭华, 等, 2021. 淮南煤田潘集煤矿外围勘查区水压致裂地应力测量研究[J]. 工程地质学报, 29(4): 972-984.
- 杨天鸿, 谭国焯, 唐春安, 等, 2002. 非均匀性对岩石水压致裂过程的影响[J]. 岩土工程学报, 24(6): 724-728.
- 张重远, 杜世回, 何满潮, 等, 2022. 喜马拉雅东构造结西缘地应力特征及其对隧道围岩稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 41(5): 954-968.
- 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.
- 赵星光, 王驹, 马利科, 等, 2014. 高放废物地质处置库北山预选区新场岩体地应力场分布规律[J]. 岩石力学与工程学报, 33(S2): 3750-3759.