



移动扫码阅读

刘利斌,段 东,郑朝阳.基于岩石声发射 Kaiser 效应的地应力测试研究[J].煤炭科学技术,2020,48(12):45-50. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.12.004
LIU Libin,DUAN Dong,ZHENG Chaoyang.Study on in-situ stress testing based on Kaiser effect of rock acoustic emission[J].Coal Science and Technology,2020,48(12):45-50. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.12.004

基于岩石声发射 Kaiser 效应的地应力测试研究

刘利斌^{1,2},段 东¹,郑朝阳¹

(1.太原理工大学 矿业工程学院,山西 太原 030024;2.西山煤电集团有限责任公司 马兰矿,山西 太原 030205)

摘 要:地应力是引起地下工程岩体变形破坏的根本作用力,地应力测试技术在煤矿安全高效开采中具有重要作用。以郑庄煤矿 3 号和 15 号煤层为工程背景,基于弹性力学及岩石声发射 Kaiser 效应对测试地应力大小和方向进行了理论分析,采用在试验室试验对地应力分布规律展开了研究,并与现场测试结果进行对比验证。研究表明:3 号和 15 号煤层垂直应力、最大水平主应力及最小水平主应力均随埋深增加而增大,2 层煤地应力分布规律十分相似,属中等应力区域;2 层煤最大水平主应力>垂直应力>最小水平主应力,即构造应力大于自重应力,属典型以构造应力为主应力场;最大水平主应力方向较稳定,基本集中在 N27°W 左右;2 层煤两顶、底板平均水平主应力(最大水平主应力与最小水平主应力的平均值)与垂直应力比值分别为 0.968、0.948、0.938、0.934。3 号煤层平均水平主应力与垂直应力之比大于 15 号煤层。研究结果对采用岩石声发射 Kaiser 效应测试矿井地应力提供了实用的参考价值与借鉴意义。

关键词:声发射;Kaiser 效应;地应力;单轴加载;主应力

中图分类号:TD353 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2020)12-0045-06

Study on in-situ stress testing based on Kaiser effect of rock acoustic emission

LIU Libin^{1,2},DUAN Dong¹,ZHENG Chaoyang¹

(1.Mining Engineering Institute,Taiyuan University of Technology,Taiyuan 030024, China;
2.Malan Coal Mine,Xishan Coal Electricity Group Company,Taiyuan 030205,China)

Abstract:In-situ stress is the fundamental force that causes deformation and failure of underground engineering rock mass. In-situ stress testing technology plays an important role in safe and efficient mining of coal mines. Based on the engineering background of No.3 and No.15 coal seams in Zhengzhuang Coal Mine, this paper conducts a theoretical analysis of the magnitude and direction of in-situ stress based on elastic mechanics and rock acoustic emission Kaiser effect. It uses laboratory tests to study the distribution of ground stress, and compare and verify with field test results. The research results show that the vertical stress, the maximum horizontal principal stress and the minimum horizontal principal stress of the No.3 and No.15 coal seams all increase with the increase of the buried depth. The in-situ stress distribution rules of the two coal seams are very similar and belong to the medium stress area; The maximum horizontal principal stress of the coal seam> the vertical stress> the minimum horizontal principal stress, that is, the tectonic stress is greater than the self-weight stress, which is a typical stress field with tectonic stress; the direction of the maximum horizontal principal stress is relatively stable and is basically concentrated around N27°W. The ratio of the average horizontal principal stress (the average of the maximum horizontal principal stress and the minimum horizontal principal stress) to the vertical stress of the No.3 and No.15 coal seams roof and floor are 0.968, 0.948, 0.938, 0.934. The ratio of the average horizontal principal stress to the vertical stress of the No.3 coal seam is larger than No.15 coal seam. The research results provide a certain reference value and significance for the use of rock acoustic emission Kaiser effect to test in-situ stress.

Key words:acoustic emission; Kaiser effect; in-situ stress; uniaxial loading; principal stress

收稿日期:2020-07-01;责任编辑:曾康生

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20111402120004);国家科技支撑计划资助项目(2012BAB13B04)

作者简介:刘利斌(1987—),男,山西忻州人,助理工程师,硕士。E-mail:503061492@qq.com

0 引言

地应力是指地下岩体在未受采动影响时存在于地壳中的应力,又称初始应力或原岩应力^[1]。对于煤矿开采,地应力与矿井开拓、巷道支护、采煤方法及采掘机械选择均有密切联系^[2]。此外,随着采掘活动逐渐向深部发展,冲击地压、煤与瓦斯突出、巷道大变形及底板突水等一系列地质灾害频发,行业学者普遍认为此根源于煤岩体地质条件与应力环境较浅部发生显著变化^[3-4]。因此,开展地应力测试工作的重要性日益凸显。

近年来,随着地应力测试技术的推广应用,地应力测试方法得到完善与发展,取得大量研究成果。水压致裂法是国内外行业标准中的推荐方法^[5-7]。秦向辉等^[8]对水压致裂测试系统柔度进行系统研究,并提出采用“关闭试验法”精确获取关闭压力。邬爱清等^[9]通过改进测试装置,解决了传统水压致裂法无法直接使用绳索芯钻杆的难题,为复杂地质条件下地应力测试工作提供了新方法。王成虎等^[10]基于理论分析提出 M-HTPF 法,减小了 HTPF 法对原生裂隙面数量要求的制约。①应力解除法也是一种常用的地应力测量方法,刘钦节等^[11]基于 Monte Carlo 法建立地应力参数敏感与误差估计模型,对测试结果可靠性及影响因素进行研究,并获得最大主应力相对误差和方位角计算公式。李远等^[12]基于双温度补偿技术提出顺延续采型地应力测试技术,实现了地应力连续准确监测。②应力恢复法是一种较早的地应力测量方法,由于在计算过程中需要较多假设,其在现场中应用较少,近年来刘泉生、张芳等^[13-14]基于埋入钻孔的压力传感器及弹性力学知识,提出流变应力恢复法,在深部软岩条件下取得了良好测量效果。应变恢复法常用于深孔地应力估算,孙东生等^[15]利用 ASR 法进行地应力原位测试,改善了传统空心包体法测试周期长、成功率低等问题。

虽然地应力原位测试是确定和评估岩体地应力状态的有效方法,但这些测量方法必须进行现场进行,工作量大,工艺复杂,在一定程度上限制了矿井地应力测量工作的推广^[16]。而声发射法具有简单、经济、可靠性高等优势,是一种较有利的地应力测量方法。笔者基于弹性力学理论推导得到岩石试件主应力大小及方位角,以郑庄煤矿 3 号和 15 号煤层为背景,开展声发射试验,利用声发射 Kaiser 效应,对地应力分布规律展开研究,并与现场实测数据进行对比验证。研究结果对采用岩石声发射 Kaiser 效应测试矿井地应力提供了参考价值与借鉴意义。

1 声发射 Kaiser 效应测试地应力原理及方法

岩石的声发射 Kaiser 效应是指对取自地下一定深度的岩石试样进行单轴压缩试验,只有当载荷达到或超过岩石曾经受到的最大应力后,才会有大量的声发射信号产生,即利用岩石内部对曾经所受应力的记忆性,可测定岩体的原岩应力。

根据弹性力学理论,将定向采取的完整岩样,按 X、Y、Z、X45°Y、Y45°Z、Z45°X 六个方向制取试件(图 1),用空间 6 个方向岩石 Kaiser 效应特征点的荷载进行计算,最终得到取样点的主应力大小及方位。根据每个试件的 Kaiser 效应特征点确定其荷载,由试件的受力面积计算出应力,多个试件的平均值即为该方向的应力测试值,并据此得到主应力的方向和方位角。所以声发射试验的数据处理,首先要计算每个试件 Kaiser 效应特征点对应的应力值。具体的计算过程如下^[17]:由式(1)计算每个试件的 Kiser 效应特征点对应的应力 σ_K 为

$$\sigma_K = 10P_K / F$$

(1)

式中: σ_K 为 Kaiser 效应特征点应力,MPa; P_K 为 Kaiser 效应特征点对应的荷载,kN; F 为试件横截面积,cm²。

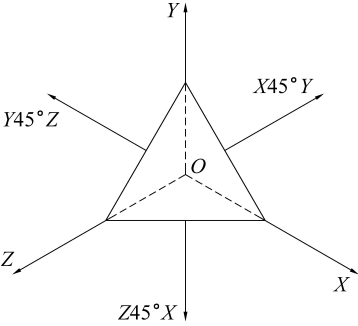


图 1 试样定向制取方向

Fig.1 Sample preparation directions

基于每个试件 Kaiser 效应特征点对应的应力,根据式(2)计算 X、Y、Z、X45°Y、Y45°Z、Z45°X 六个方向的应力分量。

1) 求各方向的应力分量。

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_X &= \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{K,X_i}}{n} \quad \sigma_{X45^\circ Y} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{K,X45^\circ Y_i}}{n} \\ \sigma_Y &= \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{K,Y_i}}{n} \quad \sigma_{Y45^\circ Z} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{K,Y45^\circ Z_i}}{n} \\ \sigma_Z &= \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{K,Z_i}}{n} \quad \sigma_{Z45^\circ X} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{K,Z45^\circ X_i}}{n} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中: σ_X 、 σ_Y 、 σ_Z 、 $\sigma_{X45^\circ Y}$ 、 $\sigma_{Y45^\circ Z}$ 、 $\sigma_{Z45^\circ X}$ 为 X 、 Y 、 Z 、 $X45^\circ Y$ 、 $Y45^\circ Z$ 、 $Z45^\circ X$ 六个方向的应力分量; $\sigma_{K,X}$ 、 $\sigma_{K,Y}$ 、 $\sigma_{K,Z}$ 、 $\sigma_{K,X45^\circ Y}$ 、 $\sigma_{K,Y45^\circ Z}$ 、 $\sigma_{K,Z45^\circ X}$ 为 X 、 Y 、 Z 、 $X45^\circ Y$ 、 $Y45^\circ Z$ 、 $Z45^\circ X$ 六个方向各试件的 Kaiser 效应特征点对应的应力; n 为每个方向的试件数量。

2) 求解主应力。根据 σ_X 、 σ_Y 、 σ_Z 、 $\sigma_{X45^\circ Y}$ 、 $\sigma_{Y45^\circ Z}$ 、 $\sigma_{Z45^\circ X}$ 六个方向的应力分量, 利用下列公式计算空间最大、中间、最小主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 。即由三次方程得

$$\sigma^3 - J_1 \sigma^2 + J_2 \sigma - J_3 = 0 \tag{3}$$

求得各主应力, 即

$$\begin{cases} \sigma_1 = 2\sqrt{\frac{-P}{3}} \cos \frac{W}{3} + \frac{1}{3} J_1 \\ \sigma_2 = 2\sqrt{\frac{-P}{3}} \cos \left(\frac{W + 2\pi}{3} \right) + \frac{1}{3} J_1 \\ \sigma_3 = 2\sqrt{\frac{-P}{3}} \cos \left(\frac{W + 4\pi}{3} \right) + \frac{1}{3} J_1 \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \text{且 } P &= -\frac{1}{3} J_1^2 + J_2; W = \arccos \left[-\frac{\theta}{2} \left(\frac{-P}{3} \right)^{-3/2} \right]; \\ \theta &= -\frac{3}{27} J_1^3 + \frac{1}{3} J_1 J_2 - J_3 \end{aligned} \tag{5}$$

J_1 、 J_2 、 J_3 为应力状态的 3 个不变量, 分别为

$$\begin{cases} J_1 = \sigma_X + \sigma_Y + \sigma_Z \\ J_2 = \sigma_X \sigma_Y + \sigma_Y \sigma_Z + \sigma_Z \sigma_X - \tau_{XY}^2 - \tau_{YZ}^2 - \tau_{ZX}^2 \\ J_3 = \sigma_X \sigma_Y \sigma_Z - \sigma_X \tau_{YZ}^2 - \sigma_Y \tau_{ZX}^2 - \sigma_Z \tau_{XY}^2 + 2\tau_{XY} \tau_{YZ} \tau_{ZX} \end{cases} \tag{6}$$

τ_{XY} 、 τ_{YZ} 、 τ_{ZX} 分别为

$$\begin{cases} \tau_{XY} = \sigma_{X45^\circ Y} - \frac{\sigma_X + \sigma_Y}{2} \\ \tau_{YZ} = \sigma_{Y45^\circ Z} - \frac{\sigma_Y + \sigma_Z}{2} \\ \tau_{ZX} = \sigma_{Z45^\circ X} - \frac{\sigma_Z + \sigma_X}{2} \end{cases} \tag{7}$$

式中: σ_X 、 σ_Y 、 σ_Z 、 $\sigma_{X45^\circ Y}$ 、 $\sigma_{Y45^\circ Z}$ 、 $\sigma_{Z45^\circ X}$ 六个应力分量即为通过声发射试验确定的应力分量。

3) 求解主应力方向。主应力的方向与坐标轴 X 、 Y 、 Z 夹角的方向余弦分别为 m_i 、 n_i 、 l_i 可按下式计算

$$\begin{cases} m_i = \frac{(\sigma_i - \sigma_X) \tau_{YZ} + \tau_{XY} \tau_{XZ}}{(\sigma_i - \sigma_Y) \tau_{XZ} + \tau_{XY} \tau_{YZ}} l_i \\ n_i = \frac{(\sigma_i - \sigma_X) (\sigma_i - \sigma_Y) - \tau_{XY}^2}{(\sigma_i - \sigma_Y) \tau_{XZ} + \tau_{XY} \tau_{YZ}} \\ l_i = \frac{1}{\sqrt{1 + A^2 + B^2}} \end{cases} \tag{8}$$

$$\text{且 } A = \frac{(\sigma_i - \sigma_X) \tau_{YZ} + \tau_{XY} \tau_{XZ}}{(\sigma_i - \sigma_Y) \tau_{XZ} + \tau_{XY} \tau_{YZ}}, B = \frac{(\sigma_i - \sigma_X) (\sigma_i - \sigma_Y) - \tau_{XY}^2}{(\sigma_i - \sigma_Y) \tau_{XZ} + \tau_{XY} \tau_{YZ}},$$

$i = 1, 2, 3$ 。

主应力的倾角和方位角可由下式计算

$$\begin{cases} \alpha_i = \arcsin n_i \\ \beta_i = \arcsin \frac{m_i}{\cos \alpha_i} \end{cases} \tag{9}$$

式中: α_i 为主应力 σ_i 与 XOY 平面的夹角, 即倾角 (仰角为正、俯角为负); β_i 为主应力 σ_i 在 XOY 面上的投影与 X 轴的夹角, 即方位角 (逆时针为正, 顺时针为负)。

2 试件加工及试验设备

2.1 试件加工

试验样品取自山西郑庄煤矿 3 号和 15 号煤层顶底板岩层。采用中国煤炭地质总局第三水文地质队钻取的 1-3 号钻孔定向岩心 ($\phi 100 \text{ mm} \times 1\,000 \text{ mm}$), 其试样清单见表 1, 分别选取 3 号和 15 号煤层顶底板岩层各 1 组, 然后在试验室, 根据岩样上标注的方位和倾向, 将岩样恢复到现场的原始状态, 在岩样上寻找一个近水平的平面, 以正北作为 X 方向, 建立 X 、 Y 、 Z 空间坐标系, 并在 X 、 Y 、 Z 、 $X45^\circ Y$ 、 $Y45^\circ Z$ 、 $Z45^\circ X$ 六个方向钻取试件 (图 1), 每个方向上钻取 3 个 $\phi 25 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的圆柱试件, 共计 72 个试件 (图 2)。在试件钻取、磨成形后, 两个加载端面经手工精磨, 使其平行度、垂直度与平整度得以充分保证, 以符合岩石力学试验标准的要求^[18]。

表 1 试样清单
Table 1 Sample lists

编号	岩性	采样层位	采样埋深/m
1	细粒砂岩	3 号煤顶板	664.55—669.73
2	细粒砂岩	3 号煤底板	752.48—755.63
3	细粒砂岩	15 号煤顶板	811.82—816.31
4	细粒砂岩	15 号煤底板	836.10—843.70



图 2 细粒砂岩试件

Fig.2 Fine-grained sandstone specimens

2.2 试验设备

试验采用的加载系统为 TYJ-600 型微机控制电液伺服岩石力学试验机,最大加载试验力为 600 kN,声发射系统为 PCI-2 型 8 通道声发射测试分析系统,采集试样在载荷作用下整个变形破坏过程中的声发射信号。试验的加载路径采用位移加载,整个过程载荷速率恒为 0.002 mm/s;声发射系统门槛值为 40 dB,采样频率为 1×10^6 次/s。

3 地应力测试过程

3.1 试件的端部处理及探头的耦合布置

由于加载过程中试件上、下端的摩擦和应力集中产生的端部效应以及所处环境的背景噪声,会影响试件本身的声发射信号,故应进行端部处理以消除这种干扰,以保证声发射设备采集到的信号仅是岩石自身的声发射信号。试验中采用的处理方法是在试件上、下端涂抹一层薄薄 1:1(质量比)硬脂酸和凡士林的混合物^[19]。

在采用上述方法对试件端部进行处理后,利用仪器的门限电压设置进行排噪,最后声发射门槛值设为 40 dB,可以有效的排除背景噪声干扰信号。为保证探头与试件之间的耦合效果,在探头与试件之间涂抹一层凡士林,并用胶带固定探头,探头的布置方式如图 3 所示,探头谐振频率为 20~200 kHz。

3.2 Kaiser 效应点的确定以及测试参数的选择

岩石试件在进行单轴加载的同时进行声发射信号的采集,声发射信号的突变点对应的应力就是岩石 Kaiser 效应特征点^[20]。在试验过程中记录声发



图3 探头布置

Fig.3 Probes arrangement

射的振铃和能量 2 种参数。根据能量率-时间的突变点作为声发射的特征点。

3.3 试验结果分析与验证

3.3.1 试验结果分析

Kaiser 效应载荷与声发射活动的典型曲线如图 4 所示。根据上述由弹性力学理论推导出来的地应力公式得主应力及其方向见表 2。

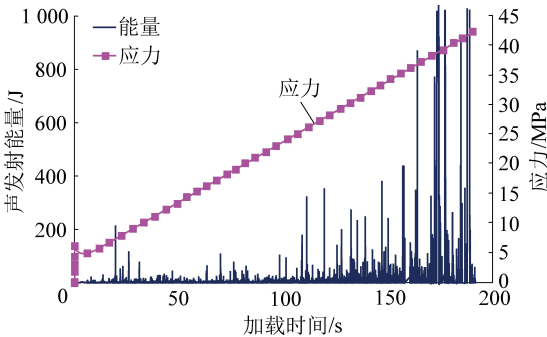


图4 15号煤层顶板试样能量与应力曲线

Fig.4 Sample energy rate and stress curves from No.15 coal seam roof

表2 地应力测试结果

Table 2 Results of in-situ stress test

序号	取样层位	埋深/m	垂直应力 σ_v /MPa	最大水平主 应力 σ_H /MPa	最小水平主 应力 σ_h /MPa	最大水平 应力方向	平均水平主应力/ 垂直应力之比
1	3号煤顶板	664.55~669.73	16.62	19.94	12.22	N26.7°W	0.968
2	3号煤底板	752.48~755.63	18.83	20.75	14.97	N27.8°W	0.948
3	15号煤顶板	811.82~816.31	20.31	21.33	16.76	N27.3°W	0.938
4	15号煤底板	836.10~843.70	20.98	22.14	17.03	N27.1°W	0.934

分析各煤层的应力分布情况如下:

1)各主应力整体上有随着埋深的增加变大的趋势,且最大水平主应力与垂直应力差别不大,3号煤层和15号煤层地应力分布规律十分相似,总体上属于中等应力区域。

2)通过对比分析可知,3号和15号煤层 $\sigma_H>\sigma_v>\sigma_h$,即构造应力大于自重应力,属于典型的以构造

应力为主的应力场。

3)最大水平主应力方位角较稳定,在北西 27°左右。分析地应力呈现这种分布的主要原因是本井田处于沁水复向斜轴部南端,构造影响显著,地应力的方位与沁水复向斜的方位很相近。构造应力场对巷道的顶底板影响大于自重应力对巷道顶底板的影响。

4)3 号、15 号煤层顶、底板平均水平主应力(最大水平主应力与最小水平主应力的平均值)与垂直应力比值分别为 0.968、0.948、0.938、0.934。3 号煤层平均水平主应力与垂直应力比值大于 15 号煤层。且 15 号煤层顶、底板平均水平主应力与垂直应力比值相差不大。

3.3.2 试验结果验证

康红普等^[21]利用水压致裂法对晋城矿区进行地应力测试,并得出晋城矿区地应力场分布规律,晋城矿区整体上属于中等地应力值矿区,浅部矿区应力特征为 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$,相对深度较大矿区应力场特征为 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ 。本次试验样品均采自埋深为 600 m 以下的巷道顶底板,试验结果显示 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$,即构造应力大于自重应力,且 Kaiser 效应试验所得的自重应力与按上覆岩层深度计算的自重应力非常吻合,应力场分布规律与康红普等的研究成果相一致,声发射 Kaiser 效应测试地应力具有一定的可靠性。

4 结 论

1)以郑庄煤矿 3 号和 15 号煤层为工程背景,基于弹性力学及岩石声发射 Kaiser 效应对地应力分布规律展开研究,通过与现场测试结果进行对比,验证了该方法的有效性。

2)3 号和 15 号煤层垂直应力、最大水平主应力、最小水平主应力均随埋深增加而增大,两煤层地应力分布规律十分相似,属中等应力区域。3 号和 15 号煤层 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$,即构造应力大于自重应力,属典型以构造应力为主应力场;最大水平主应力方向较稳定,基本集中在 N27°W 左右。

3)3 号、15 号煤层顶、底板平均水平主应力(最大水平主应力与最小水平主应力的平均值)与垂直应力比值分别为 0.968、0.948、0.938、0.934。3 号煤层平均水平主应力与垂直应力比值大于 15 号煤层。

4)由于最大水平主应力大于垂直应力,构造应力场对巷道顶底板影响大于自重应力对巷道顶底板影响,在进行巷道布置时,应合理安排巷道布置方式,尽量使巷道布置方向与最大水平主应力方向平行,以降低巷道支护困难,并在实际生产中加强矿压观测。

参考文献(References):

[1] 谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究及探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of

rock mechanics in deep group engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.
[2] 康红普.煤岩体地质力学原位测试及在围岩控制中的应用[M].北京:科学出版社,2013:16-32.
[3] 康红普,伊丙鼎,高富强,等.中国煤矿井下地应力数据库及地应力分布规律[J].煤炭学报,2019,44(1):23-33.
KANG Hongpu, YI Bingding, GAO Fuqiang, et al. Database and characteristics of underground in-situ stress distribution in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1):23-33.
[4] 周宏伟,谢和平,左建平.深部高地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.
[5] 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 and Mining Sciences, 2003, 40(7/8): 1011-1020.
[6] GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准[S].
[7] SL 264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S].
[8] 秦向辉,陈群策,赵星光,等.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,2020,39(6):1189-1202.
QIN Xianghui, CHEN Qunce, ZHAO Xingguang, et al. 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, 2020, 39(6): 1189-1202.
[9] 郭爱清,韩晓玉,尹健民,等.一种新型绳索取芯钻杆内置式双管水压致裂地应力测试方法及其应用[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5):1126-1133.
WU Aiqing, HAN Xiaoyu, YIN Jianmin, et al. A new hydraulic fracturing method for rock stress measurement based on double pressure tubes internally instead in the wire-line core drilling pipes and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1126-1133.
[10] 王成虎,邢博瑞.原生裂隙水压致裂原地应力测量的理论与实践新进展[J].岩土力学,2017,38(5):1289-1297.
WANG Chenghu, XING Borui. A new theory and application progress of the modified hydraulic test on pre-existing fracture to determine in-situ stresses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(5): 1289-1297.
[11] 刘钦节,杨科.基于 MonteCarlo 方法的地应力测量可靠性分析及其误差估算[J].采矿与安全工程学报,2016,33(5):917-923.
LIU Qinjie, YANG Ke. Reliability analysis and error estimation of in-situ stress measurement based on Monte Carlo method[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(5):917-923.
[12] 李远,王卓,乔兰,等.基于双温度补偿的瞬接续采型空心包体地应力测试技术研究[J].岩石力学与工程学报,

2017, 36(6):1479-1487.

LI Yuan, WANG Zhuo, QIAO Lan, *et al.* Development of CSIRO cell with the compromised application of instantaneous data-logging, no-power data-connection and twin temperature compensation techniques[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(6): 1479-1487.

[13] 刘泉声,罗慈友,朱元广,等.流变应力恢复法压力传感器传感单元方位布设研究[J].岩土力学, 2020, 41(1): 336-341,352.

LIU Quansheng, LUO Ciyu, ZHU Yuanguang, *et al.* Research on orientation layout of pressure sensing units by rheological stress recovery method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 336-341,352.

[14] 张芳,刘泉声,张程远,等.流变应力恢复法地应力测试及装置[J].岩土力学, 2014, 35(5):1506-1513.

ZHANG Fang, LIU Quansheng, ZHANG Chengyuan, *et al.* Geostress measurement using rheological stress recovery method and its equipment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5): 1506-1513.

[15] 孙东生,陈群策,张延庆.ASR 法在井下矿山地应力测试中的应用前景分析[J].地质力学学报, 2020, 26(1):33-38.

SUN Dongsheng, CHEN Qunce, ZHANG Yanqing. Analysis on the application prospect of ASR in-situ stress measurement method in underground mine [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(1): 33-38.

[16] 蔡美峰,乔兰.地应力测量原理和技术[M].北京:科学出版社, 1995: 13-90.

[17] 付小敏,邓荣贵.室内岩石力学试验[M].成都:西南交通大学出版社, 2012: 107-112.

[18] 付小敏,王旭东.利用岩石声发射测试地应力数据处理方法的研究[J].试验室研究与探索, 2007, 26(11):282-285.

FU Xiaomin, WANG Xudong. The research on data processing about in-situ stress measurement with AE[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2007, 26(11): 282-285.

[19] LABUZ J F, BRIDELL J M. Reducing frictional constrain in compression testing through lubrication[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1993, 30(4):451-455.

[20] 薛亚东,高德利.声发射地应力测量中凯塞点的确定[J].石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(5):1-3.

XUE Yadong, GAO Deli. Determination of Kaiser point in measurement of geo-stress with acoustic emission[J]. Journal of the University of Petroleum(Natural Science), 2000, 24(5):1-3.

[21] 康红普,姜铁明,张晓,等.晋城矿区地应力场研究及应用[J].岩石力学与工程学报, 2009, 28(1):1-8.

KANG Hongpu, JIANG Tieming, ZHANG Xiao, *et al.* Research on in-situ stress field in Jincheng Mining Area and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 1-8.