

地应力套心解除法测量精度的校验方法研究^{*}

韩晓玉

(长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010)

摘要:介绍了国内外空心包体应变计等套心解除地应力测试技术的基本情况,套心解除测试技术测量精度研究的现状,进行测量精度校验研究的依据和重要意义。提出了一种在岩石洞室进行校验试验的装置,论述了校验试验环境、物理模型组成、试验过程和试验真值获取注意事项。首次给出并重点论述了二维和三维地应力测量精度的定量表述方法,给出了量值综合误差、量值最大误差、角度综合误差和角度最大误差公式,以及多样本的平均误差公式。对上述测量精度误差公式的表述效果进行了讨论,对比了在“一般情况下”和“极端情况下”综合误差和最大误差表述方式的效果,明确了表述公式的适用性。

关键词:地应力;套心解除法;量值综合误差;角度综合误差;量值最大误差;角度最大误差

中图分类号:TU455

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2019)01-0256-06

Research on Calibrating Method for Measuring Accuracy of In-situ Stress by Overcoring Method

Han Xiaoyu

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, P.R. China)

Abstract: The paper briefly introduces the basic situation of the technology of in-situ stress measuring methods by hollow inclusion cell and other overcoring test techniques at home and abroad. It demonstrates the present situation of measurement accuracy research of the above techniques, and the basis and significance of calibrating the accuracy of measurement. A simple device for calibrating in rock caverns was proposed, and the environment of calibrating test, physical model constitution, test process and the acquisition of the truth-value were discussed. Quantitative representation methods for measuring accuracy of 2D and 3D geo-stress test results were first given and discussed emphatically. The magnitude synthetic error, error of maximum magnitude, angle synthetic error, error of maximum angle formulas, and the mean error formula for multiple samples were presented. The expression effect of the error formula were discussed. The effect of synthetic error and maximum error expressions were compared in “general” and “extreme” cases, and the applicability of the formulas were clarified.

Keywords: geo-stress; overcoring method; magnitude synthetic error; angle synthetic error; maximum magnitude error; maximum angle error

^{*} 收稿日期:2018-08-19(修改稿)

作者简介:韩晓玉(1975-),男,山东金乡人,硕士,高级工程师,主要从事岩土试验及设备研发工作。

E-mail:39595444@qq.com

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401801,2016YFC0401803);国家自然科学基金(51579016);中央级公益性科研院所基本科研业务费(CKSF2017037/YT)

0 概述

国际岩石力学学会在1987年和2003年均将CSIR、三轴应变计和孔径变形计等解除法建议为岩体地应力测试方法^[1-2]。其中,CSIR属于直接贴片测试技术,三轴应变计主要为空心包体应变测量技术,均属于孔壁应变测量方法。两测试技术单次测试可得到三维应力结果,为最高效地应力测试技术,在世界范围内的水利水电、矿山和交通等多个行业得到了广泛应用。孔壁应变法与孔径变形法、孔底应变法等一起称为地应力套心解除法,是当前规程规范中应用较多的测试方法^[3-4]。

1980年以来,澳大利亚生产的CSIRO空心包体应变计得到了较多应用^[5]。与此同时,我国的地应力套心解除测试技术不断涌现,中国科学院、中国地震局、地质力学研究所、长沙矿冶研究院和长江科学院等都研制了各自的解除测试技术。其中长江科学院研制了直接贴片技术、空心包体测试技术和孔底应变测量技术^[6-8],对空心包体技术完善了温度补偿,研制了水下浅孔解除测试技术,并在引进瑞典深孔测试技术的基础上发展了孔内采集与存储技术^[9-10]。利用上述技术,长江科学院在三峡、白鹤滩、乌东德、深圳、阳江等多个大型水电站、抽水蓄能电站工程中进行了大量应用^[11-13]。此外,北京科技大学、河南理工大学等众多机构对空心包体测试技术的应变计结构、选材、制作工艺、温度补偿、围压试验和计算程序等多个方面进行了改进^[14-17]。

套心解除地应力测试获得了广泛应用,但其测试影响因素众多,其可靠性易受到质疑。同时,作为保证测试公正的计量检定,针对套心解除,各测试技术仅能检定应变器件、采集设备等测试部分环节的性能。对此,蔡美峰等^[18]在世界上首次提出了地应力测试技术设备“工作性能、可靠性和适用性”的概念,并采用室内模型法对各解除测试技术进行了试验。由于试验采用二维加载,试验结果仅给出了 X 和 Y 方向主应力的“比较系数”,由此粗略表述解除测试技术的测量精度。此后,蔡美峰等^[19-22]提出了测量精度的概念,以及提高空心包体测试技术测量精度的措施;王衍森等^[23]研究了应变测值的校验。但上述“测量精度”研究目的主要是提高不同岩体测试条件下的“技术适应性”,或者作为不同测试条件下的技术修正措施,并未提出一般意义上的测量精度概念,更非全过程“闭环

式”的测量精度校验。

套心解除测试技术利用应变计和数据采集仪等,将初始应力场的“应力”输入转为电压等信号输出,经采集、参数试验后计算得到“应力”结果。因此,可类比机电产品的测量精度概念,封装整个测试过程,将确定的初始应力场“输入”与最终计算结果“输出”相比较,采用合适的表述方式,所得测量精度才是该测试技术(或设备,下同)的测量精度。该类校验在技术研发中处于基础地位,统一标准的校验试验可作为计量检定方法,并可应用于不同产品、甚至不同测试技术间的测量精度比较,这对于测试技术的优胜劣汰具有重要意义。

测量精度校验只能采用物理模型试验法^[18,24-25],其难点在于地应力为多维应力场。全面的测量精度校验应同时包含所有分量的校验,即应包含主应力量值加角度、或者是既定方向的正交应力加剪应力,因此,测量精度的定量表述方法是重点研究内容。本文研究内容已形成实用新型专利“解除应力测量法测量精度的校验装置”,专利授权号:ZL201721031245.6;发明专利“解除应力测量法测量精度的校验装置及方法”,专利授权号:ZL201710706939.3。上述专利给出了一种洞室三维校验试验装置和多维度地应力测量精度的定量表述方法。

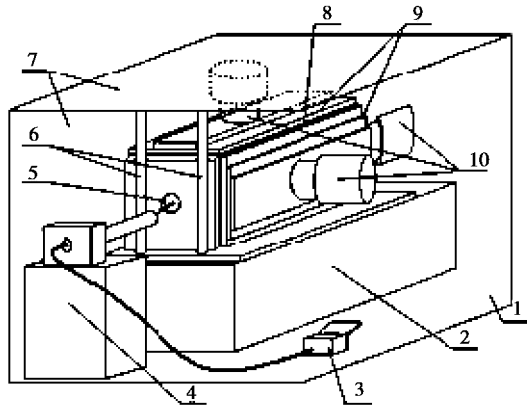
1 校验试验条件

1.1 试验环境及物理模型组成

本文及其专利技术提供了一种在岩石洞室进行校验试验的装置,具体如图1所示。采用岩石洞室作为试验环境具有的优点有:实验洞室布置方便快捷,洞室不需加固;同时,洞室内具有较为恒定的温度,因此可节省大量经费。缺点有:洞室一般存在有害气体,远离城市。

校验试验装置主要包括试验台、模型试验材料、三维预应力加载装置、用于解除试验的钻机及附属设备、应力测试元件和试验仪器等。能够实现三维预应力加载的装置包括前置传力板、反力支撑、加载传力部件以及加压及支撑部件等。

建议试验材料采用各向同性无裂隙岩块、颗粒细微的混凝土材料或与岩体特性相近的线弹性新材料。试验材料的截面400 mm×400 mm或以上。



1—试验洞室,2—试验台,3—试验电路及数据采集仪器,
4—钻机及附属设备,5—前置传力板,6—反力柱,7—洞室墙壁,
8—试验材料,9—传力部件,10—加压及支撑部件

图 1 三维物理模型试验结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three-dimensional
physical model test construction

1.2 试验过程

校验试验主要有 3 个步骤:

(1) 对实验材料进行预应力加载,建立已知的预应力环境。为了降低等值加载产生的大角度误差,三维预应力加载宜采用三向不等值加载,如 X 向为 10 MPa, Y 向 8 MPa, Z 向为 6 MPa 等。二维应力模拟时建议轴向 (Z 向) 加载为零。建议对所有试验采用相同加载方式。

(2) 仿真试验。预应力加载变形稳定后,由钻机及附属设备对试验材料进行钻孔,完成应力测试元件的埋设及仿真试验全过程,并采集试验数据。

(3) 计算测试结果,并按下文表述方法计算测量精度,提出校验试验结果。

1.3 模型试验注意事项

在岩石洞室建立校验试验条件,可作为技术研发过程的设备校验方法。建立有计量检定作用的实验室,应按照国家规定建立统一标准的试验环境和试验程序。

模型尺寸对应力分布有影响,校验试验应采用大尺度的模型。获取试验“真值”除采用加载计算方式外,在试验中可采用其他更高精度的应力感应装置,以更慎重的方式获取“真值”,或进行专门研究。

2 多维应力测量精度的定量表述公式

地应力测量结果是二维或者三维结果,在力的一般表述中存在量值较小且不易校验的剪应力,因此,采用主应力量值加角度的表述方式来消除剪应

力的校验是较好的选择。即二维应力采用大、小主应力量值加角度、三维应力采用主应力量值加主应力方位角和倾角的表述方式。

测量精度指测量结果相对于被测量真值的偏离程度。因此,地应力的测量精度可表述为其量值和角度偏离真值的程度。其定量表述可分别由量值误差和角度误差来表述。多番比较后发现,采用各主应力量值和角度的相对误差的均方根作为量值和角度综合误差的表述方法较为合理。同时计算各主应力的量值最大误差和角度最大误差作为对比表述方法,各主应力量值间、主应力的方位角和倾角间具有相同权重。

建立图 2 所示坐标系, X - Z 平面为水平面,其中 Z 轴从孔底指向孔口, Y 轴垂直向上。规定地应力“真值”的 3 个主应力量值分别为 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 ; 方位角分别为 α_1 、 α_2 和 α_3 , 各角度以正 X 轴向为 0° , 向 Y 轴正向偏转为正, 取值范围为 $\pm 180^\circ$; 各主应力倾角分别为 β_1 、 β_2 和 β_3 , 取值范围为 $\pm 90^\circ$ 。二维应力量值的大、小主应力量值分别为 σ_1 和 σ_2 , 角度分别为 α_1 和 α_2 , 取值范围为 $\pm 90^\circ$ 。

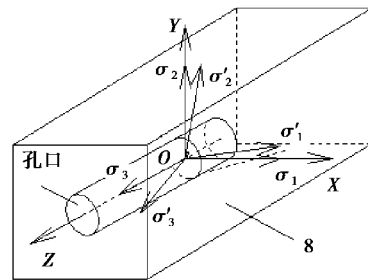


图 2 试验坐标系

Fig. 2 Experimental coordinate system

假设三维校验试验结果的主应力量值分别为 σ'_1 、 σ'_2 和 σ'_3 , 方位角分别为 α'_1 、 α'_2 和 α'_3 , 倾角分别为 β'_1 、 β'_2 和 β'_3 。二维应力量值的大、小主应力校验结果分别为 σ'_1 和 σ'_2 , 角度分别为 α'_1 和 α'_2 。坐标系和取值规定等同“真值”。若共进行 n 个试验, 则第 i 个试验应力量值误差由式(1)表示。

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_i &= \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{j=1}^k (\delta_{i-j})^2} \\ \delta_{i-k} &= \left| \frac{\sigma_k - \sigma'_k}{\sigma_k} \right| \\ \delta_{i-\max} &= \max\{\delta_{i-1}, \delta_{i-2}, \dots, \delta_{i-k}\} \end{aligned} \right. \quad (k=1 \sim 2 \text{ 或 } 1 \sim 3) \quad (1)$$

式中: k 为维度, k 为 2 时对应为二维应力测试方法, k 为 3 时对应三维应力测量方法; ε_i 为量值综

合误差; $\delta_{i-\max}$ 为最大量值误差。

n 个试验样本的平均测量误差如式(2)所示。

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (2)$$

三维应力测量的角度误差表述为式(3),因为角度真值存在 0° 的情况,无法表述测量值对真值的相对误差,因此采用“角度偏差”相对“角度取值域的一半”作为“角度相对误差”,下称角度误差;各方位角间和倾角间具有相同权重。计算所有角度误差的均方根作为角度综合误差 Δ_i ,并计算最大角度误差 $\vartheta_{i-\max}$ 。二维应力测量的角度误差表示为式(4),同类试验的 n 个试验样本的角度测量误差如式(5)所示。

$$\begin{cases} \Delta_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (\xi_k^2 + \zeta_k^2)} \\ \xi_k = \left| \frac{\alpha_k - \alpha'_k}{180} \right|; \quad \zeta_k = \left| \frac{\beta_k - \beta'_k}{90} \right| \\ \vartheta_{i-\max} = \max\{\xi_1, \xi_2, \xi_3, \zeta_1, \zeta_2, \zeta_3\} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $|\alpha_k - \alpha'_k|$ 和 $|\beta_k - \beta'_k|$ 为角度偏差; ξ_k 和 ζ_k 分别为方位角和倾角的角度误差; Δ_i 为角度综合误差; $\vartheta_{i-\max}$ 为最大角度误差。

在不等值加载方式下,合格测试技术一般不会出现大角度误差的情况,但在图1模型试验设置和图2设定坐标系下,第二主应力易出现小偏差而大方位角误差情况。为此,一是取消 ξ_2 的校验, m 取值5,该方法简单易行,但其结果非全要素检验。二是改变图1试验台水平向的布置(如倾斜 45°)、维持模型垂直面力加载方式;或者维持模型位置不变,旋转图2直角坐标系,改变“倾角”和“方位角”的定义。即只需模型加载应力的方向与图2坐标系的轴向有较大夹角,不存在小偏差而大角度误差的情况,此时 m 取值6。建议采用最后一种方法进行校验。

二维应力角度误差表述为:

$$\begin{cases} \Delta_i = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\left| \frac{\alpha_1 - \alpha'_1}{90} \right|^2 + \left| \frac{\alpha_2 - \alpha'_2}{90} \right|^2 \right)} \\ \vartheta_{i-\max} = \max \left\{ \left| \frac{\alpha_1 - \alpha'_1}{90} \right|, \left| \frac{\alpha_2 - \alpha'_2}{90} \right| \right\} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $|\alpha_1 - \alpha'_1|$ 和 $|\alpha_2 - \alpha'_2|$ 分别为大主应力和小主应力角度偏差; Δ_i 和 $\vartheta_{i-\max}$ 定义同(3)式。

n 个试验样本的角度平均误差为:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (5)$$

式(2)和式(5)给出了重复试验的平均误差,多次重复试验具有严谨性和代表性。

3 适用性讨论

以三维地应力测试技术的校验为例,利用式(1)和式(3)给出了三维主应力量值和角度误差在一般情况下和极端情况下的定量表述示例,量值误差示例见表1,角度误差示例见表2。

表1 采用式(1)表述三维地应力量值误差示例

Table 1 Examples of expressing 3D geo-stress magnitude error by using formula (1)

序号	ε_{i-1}	ε_{i-2}	ε_{i-3}	ε_i	$\delta_{i-\max}$
1	2.0%	5.0%	4.0%	3.9%	5.0%
2	0.0%	6.1%	6.1%	5.0%	6.1%
3	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%
4	0.0%	0.0%	8.6%	5.0%	8.6%
5	0.0%	12.3%	12.3%	10.0%	12.3%
6	0.0%	0.0%	17.4%	10.0%	17.4%
7	0.0%	0.0%	30.0%	17.3%	30.0%

表2 采用式(3)表述三维地应力的角度误差结果

Table 2 Examples of expressing 3D geo-stress angle error by using formula (3)

序号	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ζ_1	ζ_2	ζ_3	Δ_i	$\vartheta_{i-\max}$
1	3.3%	5.6%	1.7%	3.3%	7.8%	5.6%	5.0%	7.8%
2	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%
3	12.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%	12.2%
4	8.6%	8.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%	8.6%
5	24.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0%	24.4%
6	17.3%	17.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0%	17.3%
7	33.3%	0%	0%	0%	0%	0%	13.6%	33.3%

由表1知,一般情况下,序号1所示误差示例的量值综合误差 ε_i 相对于各主应力量值误差既非最大值也非最小值,具有“平均”作用。在极端情况下,一个主应力量值误差为0,另两个主应力量值误差为6.1%时量值综合误差为5.0%,最大量值误差为6.1%。单个主应力量值误差为8.6%,另两个量值误差为0时,综合量值误差为5.0%,最大量值误差为8.6%。当单个主应力量值误差为30%,另外两个量值误差为0,则量值综合误差为17.3%,最大量值误差为30%,两种表述方式差异较大。其他一些情况不再赘述。

由此,量值综合误差 ε_i 总是小于等于量值最大相对误差 $\delta_{i-\max}$;采用量值综合误差 ε_i 表述出的测量精度有“平均”各主应力量值误差的效果;非极端情况下量值误差数值大小适中,匹配解除法测试技术的发展现状;采用量值最大相对误差 $\delta_{i-\max}$ 来表述测量精度则较“严格”,即以同等测量精度

指标设计测试技术时,采用后者表述的技术需要有更高的准确度。在极端情况下,主应力量值误差较大时,两种表述结果差异较大。

由表2知,一般情况下,序号1、2所示误差结果的角度综合误差 Δ_i 对各角度误差具有“平均”作用。极端情况下,当一个主应力方位角的真值与测量值差值为 22° 或倾角误差差值为 11° ,其角度误差为12.2%,同时其他方位角和倾角误差均为0时,则量值综合误差为5.0%,角度最大误差为12.2%。当两个主应力方位角的角度偏差为 15.5° 或倾角偏差 7.8° ,其相对误差为8.6%,同时其余方位角和倾角误差均为0时,量值综合误差为5.0%,最大角度误差为8.6%。当一个方位角的角度偏差为 60° 或倾角偏差为 30° ,其相对误差为33.3%,同时其他方位角和倾角误差均为0时,则角度综合误差为13.6%,角度最大误差为33.3%,此条件下,两表述方式差异较大。其他不再赘述。与量值误差的论述相同,角度综合误差 Δ_i 与最大角度误差 $\theta_{i-\max}$ 的关系具有相似结论。

综上,极端情况下综合误差与最大误差表述方式差异较大,但采用量值综合误差和角度综合误差对各主应力的量值或角度误差有“平均”作用,在测量误差较小条件下(如设定 $<10\%$ 为合格测试技术),该表述方式计算所得测量精度的误差数值大小适中,匹配解除法测试技术的发展现状。当测试技术发展完备时,可采用更“严格”的测量精度表述方式。进一步而言,取量值综合误差和角度综合误差的均值作为测量精度的定量标准,或者采用其他合理变化的表述方法均具有一定意义,其校验应用和技术对比可推动行业发展。

4 结论

(1)在岩石洞室建立校验试验条件,采用不等值加载方式进行模型试验,是设备校验条件的简便构筑方法,可参照建立检定试验条件。

(2)多维地应力测量精度的量值综合误差和角度综合误差的定量表述公式,有“平均”各主应力量值误差和角度误差的特点,是一种定量表述测量精度的方法,具有合理性,匹配解除法测试技术现状。

(3)地应力测量精度的统一表述方法具有重要意义,可应用于单个测试技术的校验和检定、不同测试技术间比较,对于推动行业发展具有重要意义。

参考文献(References)

[1] Kim K, Franklin J A. Suggested methods for rock stress determination [J]. International Journal of Rock

Mechanics Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1987, 24(1): 53-73.

- [2] Sjöberg J, Christiansson R, Hudson J A. ISRM suggested methods for rock stress estimation-Part 2: overcoring methods [J]. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences, 2003, 40(7): 999-1010.
- [3] 中华人民共和国国家标准编写组. 工程岩体试验方法标准(GB/T 50266-2013) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2003. (The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Standard for test methods of engineering rock mass (GB/T 50266-2003) [S]. Beijing: China Planning Press, 2003. (in Chinese))
- [4] 中华人民共和国行业标准编写组. 水利水电工程岩石试验规程(SL264-2001) [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering (SL264-2001) [S]. Beijing: China Water Power Press, 2001. (in Chinese))
- [5] 高会春, 杨胜利, 刘新杰, 等. 空心包体地应力测试方法与工程应用 [J]. 煤炭工程, 2015, 47(4): 83-85, 89. (Gao Huichun, Yan Shengli, Liu Xinjie, et al. Hollow inclusion in-situ stress test method and engineering application [J]. Coal Engineering, 2015, 47(4): 83-85, 89. (in Chinese))
- [6] 刘允芳, 尹健民, 刘鸿. 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, Liu Hong. Geostress measurement methods and engineering application [M]. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 2014. (in Chinese))
- [7] 刘允芳, 尹健民, 刘元坤. 空心包体式钻式三向应变计测试技术探讨 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 291-296. (Liu Yunfang, Yin Jianmin, Liu Yuankun. Measuring techniques for hollow inclusion triaxial strain cells [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 291-296. (in Chinese))
- [8] 刘元坤, 石安池, 韩晓玉, 等. 裂隙较发育岩体的地应力测量与研究 [J]. 长江科学院院报, 2017, 34(12): 63-67. (Liu Yuankun, Shi Anchi, Han Xiaoyu, et al. Measurement and research on in-situ stress of joined and fractured rock mass [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(12): 63-67. (in Chinese))
- [9] 刘允芳, 尹健民, 刘元坤. 深钻孔套芯应力解除法的测量技术和实例 [J]. 长江科学院院报, 2008, 25(5): 1-6. (Liu Yunfang, Yin Jianmin, Liu Yuankun. Measuring techniques and examples of overcoring method in deep borehole [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(5): 1-6. (in Chinese))

- [10] 刘元坤,尹健民,邹爱清,等.一种存储式地应力测试装置[P].中国专利:201220109463.8,2012-10-10.(Liu Yuankun, Yin Jianmin, Wu Aiqing, et al. A storage type geostress measurement device[P]. People's Republic of China: 201220109463.8, 2012-10-10. (in Chinese))
- [11] 韩晓玉,黄孝泉,李永松,等.乌东德水电工程河谷地应力场分布规律[J].长江科学院院报,2015,32(11):34-39.(Han Xiaoyu, Huang Xiaoquan, Li Yongsong, et al. Distribution of geostress field in the valley of Wudongde hydropower project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(11):34-39.(in Chinese))
- [12] 李永松,尹健民,艾凯,等.深圳抽水蓄能电站地应力测试分析及其在地下洞室设计中的应用[J].岩石力学及工程学报,2006,25(增2):3965-3970.(Li Yongsong, Yin Jianmin, Ai Kai, et al. Measurement and analysis of geostress for underground engineering design of Shenzhen pumped storage plant[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, (Supp.2):3965-3970.(in Chinese))
- [13] 艾凯,王汇明,韩晓玉,等.阳江抽水蓄能电站套心解除法深钻孔三维地应力测量研究[J].华北水利水电学院学报,2007,28(4):72-75.(Ai Kai, Wang Huiming, Han Xiaoyu, et al. Overcoring method in deep borehole of 3D geostress measuring research at Yangjiang pumped storage plant[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2007, 28(4):72-75.(in Chinese))
- [14] 乔兰,蔡美峰.应力解除法在某金矿地应力测量中的新进展[J].岩石力学与工程学报,1995,14(2):25-32.(Qiao Lan, Cai Meifeng. New development of stress relief method for determination of in-situ stresses in a gold mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(2):25-32. (in Chinese))
- [15] 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. 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. (in Chinese))
- [16] 隋智力,乔兰,孙歆硕,等.改进型空心包体应变计测量裕源井田地应力[J].金属矿山,2009(8):76-79.(Sui Zhili, Qiao Lan, Sun Xinshuo, et al. In-situ stress measurement by CSIRO hollow inclusion cell in Yuyuan mine[J]. Metal Mine, 2009(8):76-79.(in Chinese))
- [17] 刘少伟,樊克松,尚鹏翔.空心包体应力计温度补偿元件的设计及应用[J].煤田地质与勘探,2014,42(6):105-109.(Liu Shaowei, Fan Kesong, Shang Pengxiang. Design and application of temperature compensating element of hollow inclusion stress gauge[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(6):105-109.(in Chinese))
- [18] 蔡美峰,乔兰,李华斌.地应力测量原理和技术[M].科学出版社,1995.(Cai Meifeng, Qiao Lan, Li Huabin. Principle and technique of geostress measurement[M]. Science Press, 1995.(in Chinese))
- [19] 蔡美峰.提高地应力测量精度几个问题的研究[J].长江科学院院报,1992,9(3):45-52.(Cai Meifeng, A Study on some problems of geostress survey accuracy[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1992, 9(3):45-52.(in Chinese))
- [20] 蔡美峰,乔兰,于劲波.空心包体应变计测量精度问题[J].岩土工程学报,1994,16(6):15-20.(Cai Meifeng, Qiao Lan, Yu Jinbo. Problems on accuracy of hollow inclusion strain cell[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1994, 16(6):15-20.(in Chinese))
- [21] 李远,乔兰,孙歆硕.关于影响空心包体应变计地应力测量精度若干因素的讨论[J].岩石力学与工程学报,2006,25(10):2140-2144.(Li Yuan, Qiao Lan, Sun Xinshuo. Analyses of some factors affecting precision in in-situ stress measurement with method of CSIRO cells[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10):2140-2144.(in Chinese))
- [22] Cai M, Qiao L, Yu J. Study and tests of techniques for increasing overcoring stress measurement accuracy[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1995, 32(4):375-384.
- [23] 王衍森,吴振业.地应力测量应变值检验及应变计最佳布片方式[J].岩土工程学报,1999,21(1):53-55.(Wang Yansen, Wu Zhenye. Direct method to verify virgin stress measurement and the optimum rosette arrangement style of hollow inclusion cell[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1):53-55.(in Chinese))
- [24] 韩晓玉,李永松,李峰.地应力测值评价方法研究[J].人民长江,2011,42(24):7-9.(Han Xiaoyu, Li Yongsong, Li Feng. Research on evaluation methods for measured data of geo-stress[J]. Yangtze River, 2011, 42(24):7-9.(in Chinese))
- [25] 韩晓玉,明静,艾凯.常用地应力测试技术评价[J].长江科学院院报,2010,27(12):36-41.(Han Xiaoyu, Ming Jing, Ai Kai. Evaluation on commonly used methods of in-situ stress testing technique[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(12):36-41.(in Chinese))