

# 深部花岗岩 CSIRO 地应力测量中高压双轴 加卸载试验及非线性弹性分析模型

乔 兰, 张亦海, 李 远, 付双双

(北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了消除深部岩体非线性特性对 CSIRO 方法地应力测量误差, 通过室内三轴压缩试验等手段, 提出一种平均应力与体积模量和剪切模量之间的非线性双曲线模型, 模型参数具有明确的物理意义, 且线性只是非线性关系中特例。在进行高压双轴加卸载试验时, 研发了一套高压双轴加载试验装置以模拟解除岩芯的高压环境。将非线性双曲线模型用于 CSIRO 解除岩芯的平均应力与应变之间的非线性关系特征方程中, 与传统线性方法处理数据进行了误差对比, 所提出的非线性方法具有更高的精度。加入参数  $k_1$  消除环氧树脂胶对计算带来的误差, 且  $k_1$  对体积模量和剪切模量不敏感, 可以用分段线性拟合的方法确定。

**关键词:** 岩石力学; 深部岩体; 地应力测量; CSIRO; 双轴加压试验; 岩石非线性

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2019)01 - 0040 - 09

## A non-linear elastic model and high-level biaxial loading and unloading test for CSIRO in-situ stress measurement in deep granite

QIAO Lan, ZHANG Yihai, LI Yuan, FU Shuangshuang

(School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to eliminate the measurement error of CSIRO method due to nonlinear characteristics of deep rock mass, a nonlinear hyperbolic model with physical meaning parameters, describing the relationship between the mean stress with the bulk modulus and the shear modulus, is put forward through triaxial compression test. A set of high-pressure biaxial loading test device is developed to simulate core high stress relief, and high-level biaxial loading and unloading test is performed. The nonlinear hyperbolic model is applied to CSIRO characteristic equations of the nonlinear relationship between the mean stress and the strain. Compared with the traditional linear method, the proposed nonlinear method has a higher precision. A parameter,  $k_1$ , which is not sensitive to the volume modulus and the shear modulus and can be determined by piecewise linear fitting, is introduced to eliminate the calculation error caused by epoxy resin glue.

**Key words:** rock mechanics; deep rock; in-situ stress measurement; CSIRO; biaxial pressurization test; nonlinear elasticity in rock

## 1 引 言

在地下空间的开挖设计和稳定性分析中, 地应

力是最为重要的考虑因素, 因此地应力参数在深部地下工程的开挖中非常重要<sup>[1]</sup>。国际岩石力学学会 (ISRM) 推荐的主要地应力测量方法<sup>[2]</sup>有定性估计法、套孔解除法、水压致裂法、定量估计法 4 种,

**收稿日期:** 2018 - 06 - 25; **修回日期:** 2018 - 09 - 12

**基金项目:** 国家重点研发计划(2016YFC0600703)

Supported by the State Key Research Funds for the Central Universities(Grant No. 2016YFC0600703)

**作者简介:** 李 远(1980 -), 男, 2008 年于北京科技大学岩土工程专业获博士学位, 现任副教授, 主要从事岩石力学与工程试验测试方面的教学与研究。E-mail: liyuan@ustb.edu.cn。通讯作者: 乔 兰(1963 -), 女, 现任教授、博士生导师。E-mail: lanqiao@ustb.edu.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0735

其中，套孔解除法以澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)解除岩心应变测量为典型。

CSIRO 空心包体地应力测量方法在 1970 年左右发明<sup>[3]</sup>。此方法与解除岩芯弹性解除应变直接相关，可以较为准确地获得一点的三维原始应力状态，且应力回算基于线弹性理论假设。随着深度增加，地应力不断增大，同时岩体的非线性行为突出，在数据分析及应力计算中把岩体看成线性材料计算具有很大的误差。

传统 CSIRO 电池配备长约 20 m 电线，用于从钻孔的应变仪内到钻孔外的采集器信号的传输，因此可能会导致信号衰减和解除过程中数据的不稳定。为了提高 CSIRO 的准确性，蔡美峰<sup>[4]</sup>提出了一种特殊的电路和温度补偿算法。在数据处理中剔除了温度变化的影响，使得测量精度提高 20% 以上。白金朋等<sup>[5]</sup>研发出一种无线数字 CSIRO 空心包体，但在深部地层原始应力的测量过程中，并没有考虑岩体非线性对计算结果带来的影响。

岩石和岩体在不同的应力水平下表现很强的非线性力学行为，因此很多学者提出了非线性变形模型。空心包体解除岩芯是一个完整的岩芯，在应力分析和计算中考虑非线性弹性模型是合理的。S. I. Majtenyi 等<sup>[6]</sup>提出了一种非线性材料模型，随后 F. H. Kulhawy 和 J. M. Duncan<sup>[7]</sup>对模型进行了修正。该模型采用双曲线应力 - 应变关系，并将其作为隧道变形分析的非线性弹性模型。砂岩的单轴和三轴试验数据被多项式拟合，G. E. Exadaktylos<sup>[8]</sup>利用二次表达式计算切线弹性模量与轴向应变。谢和平等<sup>[9]</sup>对玄武岩试件进行了一系列的测试，并将弹性模量和泊松比对深度的依赖性进行了说明。此外，还有基于弹性模量或杨氏模量为基础的非线性模型，但应变和深度都不能用于应力状态的计算，因此需要一个普遍适用的非线性弹性模型，以应用于 CSIRO 空心包体应变计测量计算中。本文研发了一个高压双轴试验仪器来模拟深部岩体的应力水平，提出了一种非线性弹性模型处理双轴加载试验数据，且与线性弹性分析结果进行对比，非线性模型更适用于双轴高压加载试验数据的处理。

## 2 高压双轴加载试验技术

双轴加载试验设备用于确定解除岩芯的弹性模量和泊松比。旧版本的双轴加载装置如图 1(a)所示。

解除岩芯放置在橡胶皮套增压室内。手动压力泵配有压力表用于测量当前的压力。在试验中解除岩芯样本处于平面应力状态，假设整个加载过程为线性弹性，可以推导出弹性模量  $E$  计算见公式：

$$E = \frac{\sigma_r}{\varepsilon_\theta} \frac{2R^2}{R^2 - r^2} \quad (1)$$

式中： $\sigma_r$  为径向压力(压缩应力为正)； $R$ ， $r$  分别为解除岩芯外半径和小孔半径； $\varepsilon_\theta$  为 3 组应变花环向应变的平均值。

考虑环氧树脂胶厚度的影响，蔡美峰<sup>[4]</sup>对此公式进行了修正：

$$E = k_1 \frac{\sigma_r}{\varepsilon_\theta} \frac{2R^2}{R^2 - r^2} \quad (2)$$

式中： $k_1$  为由环氧树脂胶引起的修正系数<sup>[10]</sup>。

泊松比  $\nu$  计算公式为

$$\nu = -\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_\theta} \quad (3)$$

式中： $\varepsilon_a$  为三组应变花轴向应变平均值。

图 1 为双轴加载试验数据。试验过程中径向压力采用手动压力泵逐步地加载，每 2 MPa 记录一次压力和应变数据，微应变与围压关系如图 1 所示，且最大加载压力为 10 MPa。

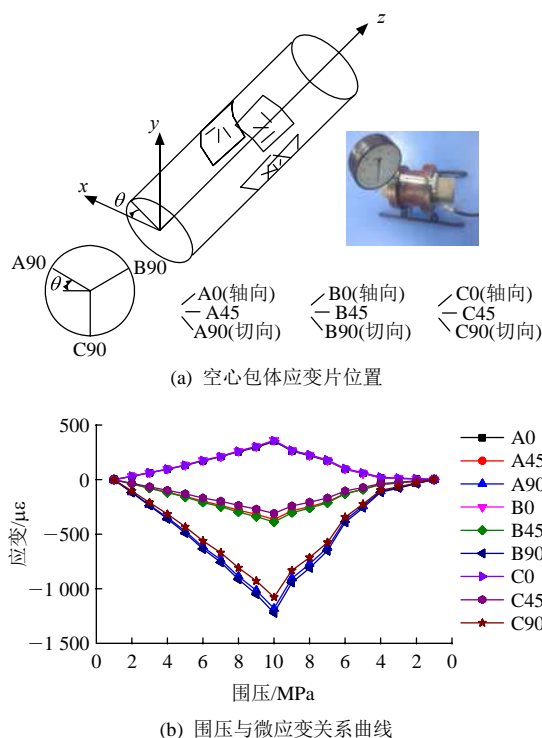
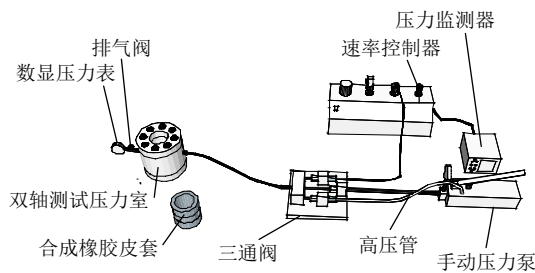


图 1 应变片位置与双轴试验数据典型曲线

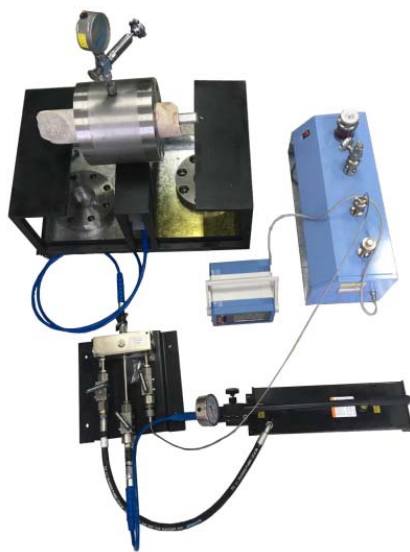
Fig.1 Layout of gauges in biaxial test and typical calibration curves of biaxial test

### 2.1 高压双轴试验仪器研发

蔡美峰<sup>[4]</sup>分析了岩石弹性行为与卸载应变数据的关系，并用于计算岩体所受原位应力。此外，当外加径向压力足够高，解除岩芯的非线性行为也是越发明显。锦平水电站<sup>[11]</sup>和玲珑金矿<sup>[10]</sup>深部岩体地应力测量结果表明，双轴试验的径向压力大约需要加载到 60 MPa，才能模拟现场的原位应力大小。传统的双轴加载试验设备最大围压加载到 20 MPa(实验室内测得)，不能满足深部岩体解除岩芯的高压双轴试验。因此对传统的设备进行改造，设计并制造了一种能够进行高围压测试的双轴加载装置，如图 2 所示。高压舱体设计承受的最大径向压力为 200 MPa，两侧有硬度较大的盖板，盖板与舱体之间通过 8 个等分的高强度螺栓连接，碳纤维高强度合成橡胶皮套放入高压舱体中，皮套中心孔放入 CSIRO 空心包体解除岩芯。岩芯与盖板中心孔之间有一定的间隙，间隙过大则会将皮套挤入造成皮套应力集中从而破裂，目前试验测试所得当间隙为 1 mm 时最大径向压力为 120 MPa。通过调节加载速率可以确保缓慢稳定的加压。



(a)



(b)

图 2 高压双轴试验仪器

Fig.2 High pressure biaxial test equipments

### 2.2 双轴试验中非线性变形计算

弹性模量  $E$  和泊松比  $\nu$  可以应用卸载数据的线性拟合根据式(2)和(3)计算出，然而岩石在高应力下非线性力学行为尤为突出，因此在地应力计算过程中需引入非线性关系。从几个现场应力测量点采集了花岗岩、石英岩和磁铁矿等岩样，皇甫琪<sup>[12]</sup>讨论了单轴压缩和三轴压缩试验的非线性力学行为。本文的非线性应力和变形关系由下列方程描述：

$$K = K_0 + \frac{P}{a + bp} \tag{4}$$

$$G = G_0 + \frac{P}{c + dp} \tag{5}$$

其中，

$$\frac{1}{a} = \left. \frac{dK}{dp} \right|_{p=0} \tag{6}$$

$$\frac{1}{b} = K \Big|_{p=\infty} - K_0 = \Delta K_{ult} \tag{7}$$

$$\frac{1}{c} = \left. \frac{dG}{dp} \right|_{p=0} \tag{8}$$

$$\frac{1}{d} = G \Big|_{p=\infty} - G_0 = \Delta G_{ult} \tag{9}$$

式中： $p$  为平均应力； $K_0$ ， $G_0$  分别为初始的体积模量和剪切模量，即当  $p=0$  时  $K$  和  $G$  的值。

对三山岛金矿花岗岩岩芯进行制样加工，根据国际岩石力学学会 (ISRM) 建议方法对岩石进行加工，且试件两端面的平整度允许偏差为  $\pm 0.05$  mm；断面垂直于试件轴线，允许偏差为  $\pm 0.25^\circ$ 。制备的标准圆柱试样 ( $\phi 50$  mm  $\times$  100 mm) 见图 3。



图 3 花岗岩加工试件

Fig.3 Granite specimens

进行围压 10，20，30 MPa 三轴抗压强度试验，轴向按 0.024 mm/min 变形控制加载至岩石破坏。试验数据见图 4，并根据试验获得的数据，利用式(4)和(5)进行拟合，如图 5 和 6 所示。可以看出，非线性

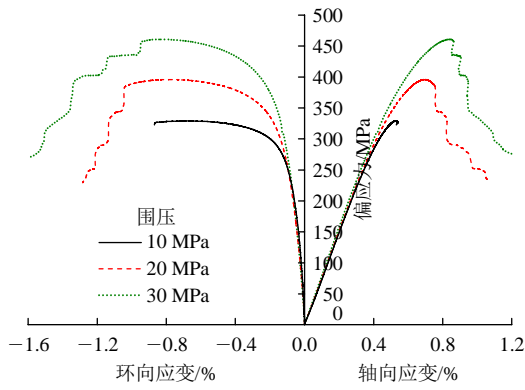
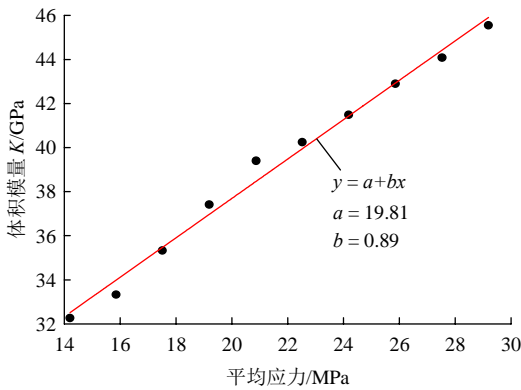
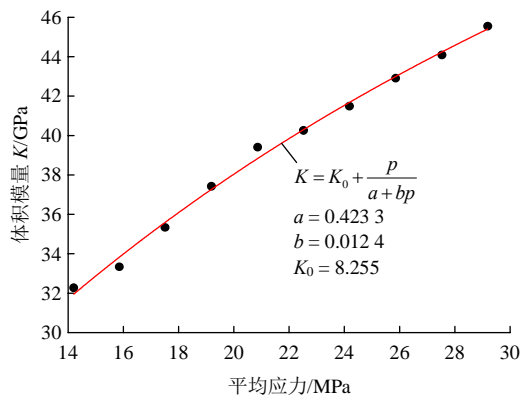


图 4 三轴抗压强度数据

Fig.4 Triaxial compression strength



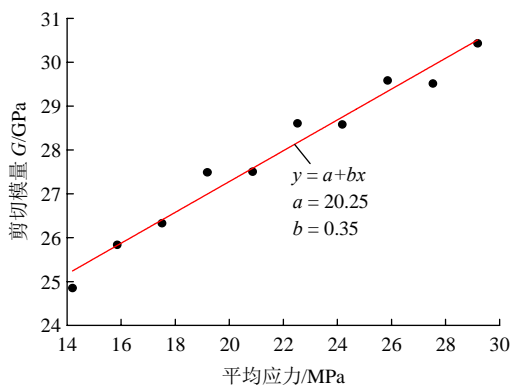
(a) 线性拟合



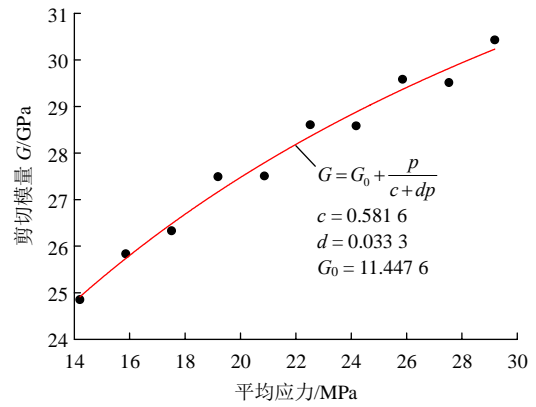
(b) 非线性拟合

图 5 体积模量与平均应力拟合(围压 10 MPa)

Fig.5 Bulk modulus vs. the mean stress(confining pressure 10 MPa)



(a) 线性拟合



(b) 非线性拟合

图 6 剪切模量与平均应力非线性拟合(围压 10 MPa)

Fig.6 Shear modulus vs. the mean stress(confining pressure 10 MPa)

性拟合比线性拟合精度要高，应用非线性方法拟合后，数据点和曲线之间应用最小二乘法寻找最小残余误差平方和：

$$\sum \delta_{K_i}^2 = \sum (K_i - K|_{p=p_i})^2 \quad (10)$$

$$\sum \delta_{G_i}^2 = \sum (G_i - G|_{p=p_i})^2 \quad (11)$$

式中： $\delta_{K_i}$ 和 $\delta_{G_i}$ 分别为点 $(p_i, K_i)$ 和 $(p_i, G_i)$ 的体积模量和剪切模量的残差。

由式(10)和(11)可知，体积模量线性拟合平方残余误差为 2.02 GPa<sup>2</sup>，非线性拟合平方残余误差为 0.86 GPa<sup>2</sup>；剪切模量线性拟合平方残余误差为 1.88 GPa<sup>2</sup>，非线性拟合平方残余误差为 0.55 GPa<sup>2</sup>。式(4)和(5)可以用来描述现场岩石的非线性行为，且当参数  $b$  和  $d$  为 0 时，即为线性关系，因此线性关系只是非线性关系的一种特例。

因为在三轴压缩试验中平均应力在不断变化，以应力 - 应变曲线的弹性段线性部分的中点作为非线性分析的样本数据(见图 7)，应力 - 应变曲线的线弹性部分的数据用于计算杨氏模量和泊松比，计算公式如下：

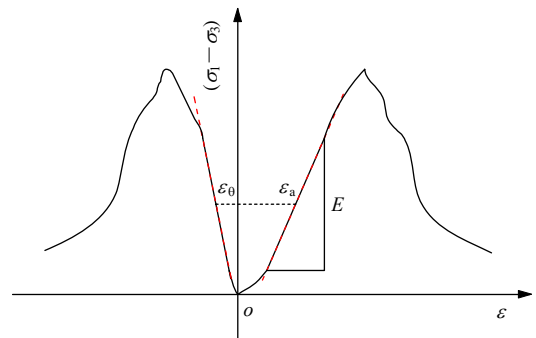


图 7 弹性模量和泊松比的计算

Fig.7 Determination of Young's modulus and Poisson's ratio in triaxial test

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (12)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (13)$$

解除岩芯双轴加载试验中，径向应力与 CSIRO 中平均径向应变在一定压力范围，非线性关系可以应用分段线性分析。则式(1)和(3)用增量形式改写成以下形式：

$$E_p = \frac{\Delta\sigma_r}{\Delta\varepsilon_\theta} \frac{2R^2}{R^2 - r^2} \quad (14)$$

$$\nu_p = -\frac{\Delta\varepsilon_a}{\Delta\varepsilon_\theta} \quad (15)$$

式中： $E_p$ ， $\nu_p$  分别为杨氏模量和泊松比； $\Delta\sigma_r$  为径向压力增量式(压缩应力为正)； $\Delta\varepsilon_\theta$ ， $\Delta\varepsilon_a$  分别为 3 组应变花环向应变和轴向应变的平均值增量。

将式(14)和(15)代入式(12)和(13)得

$$K = \frac{\Delta\sigma_r}{\Delta\varepsilon_\theta} \frac{2R^2}{R^2 - r^2} \frac{1}{3 \left( 1 + 2 \frac{\Delta\varepsilon_a}{\Delta\varepsilon_\theta} \right)} \quad (16)$$

$$G = \frac{\Delta\sigma_r}{\Delta\varepsilon_\theta} \frac{2R^2}{R^2 - r^2} \frac{1}{2 \left( 1 - \frac{\Delta\varepsilon_a}{\Delta\varepsilon_\theta} \right)} \quad (17)$$

在双轴加载试验中，平均应力和径向应力的关系为

$$p = \frac{2\sigma_r}{3} \quad (18)$$

式(16)和(17)化简得

$$K = \frac{\Delta p}{\Delta(\varepsilon_\theta + 2\varepsilon_a)} \frac{R^2}{R^2 - r^2} \quad (19)$$

$$G = \frac{3\Delta p}{2\Delta(\varepsilon_\theta - \varepsilon_a)} \frac{R^2}{R^2 - r^2} \quad (20)$$

将式(4)和(5)代入式(19)和(20)化简得

$$\Delta(\varepsilon_\theta + 2\varepsilon_a) = \frac{(a+bp)\Delta p}{aK_0 + (bK_0+1)p} \frac{R^2}{R^2 - r^2} \quad (21)$$

$$\Delta(\varepsilon_\theta - \varepsilon_a) = \frac{(c+dp)\Delta p}{cK_0 + (dK_0+1)p} \frac{3R^2}{2(R^2 - r^2)} \quad (22)$$

对式(21)和(22)两边积分得

$$(\varepsilon_\theta + 2\varepsilon_a) = \frac{R^2}{R^2 - r^2} \left[ \frac{bp}{bK_0 + 1} + \frac{a}{(bK_0 + 1)^2} \ln \frac{aK_0 + (bK_0+1)p}{aK_0} \right] \quad (23)$$

$$(\varepsilon_\theta - \varepsilon_a) = \frac{3R^2}{2(R^2 - r^2)} \left[ \frac{dp}{dG_0 + 1} + \frac{c}{(dG_0 + 1)^2} \ln \frac{cG_0 + (dG_0+1)p}{cG_0} \right] \quad (24)$$

如果考虑到环氧树脂胶厚度的影响，加入了一个修正参数  $k_1$ ，见式(3)。M. E. Duncan Fama 和 M. J. Pender<sup>[13]</sup>定义了这个参数，如下：

$$k_1 = d_1(1 - \nu_1\nu_2) \left( 1 - 2\nu_1 + \frac{R_1^2}{\rho^2} \right) + \nu_1\nu_2 \quad (25)$$

式中： $\nu_1$  为环氧树脂胶的泊松比， $\nu_2$  为岩体的泊松比， $R_1$  为空心包体的内径， $\rho$  为应变片径向位置坐标， $d_1$  定义如下：

$$d_1 = \frac{1}{1 - 2\nu_1 + m^2 + n(1 - m^2)} \quad (26)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} m &= \frac{R_1}{R_2} \\ n &= \frac{G_1}{G_2} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

式中： $R_2$  为安装小孔半径， $G_1$  为环氧树脂胶的剪切模量， $G_2$  为岩体的剪切模量。

笔者所在课题组研制的双温度补偿数字型空心包体应变计及安装所用的环氧树脂胶的参数为  $R_1 = 15.5 \text{ mm}$ ， $R_2 = 42 \text{ mm}$ ， $\nu_1 = 0.29$ ， $E_1 = 3 \text{ GPa}$ ， $\rho = 17.50 \text{ mm}$ 。因此  $k_1$  取值取决于岩石的弹性模量  $E_2$  和泊松比  $\nu_2$ ，表 1 为岩体弹性模量为 10~50 GPa，泊松比为 0.20~0.35 范围内  $k_1$  计算值。

表 1 弹性模量和泊松比对  $k_1$  参数灵敏度

Table 1 Sensitivity of  $k_1$  to Young's modulus and Poisson's ratio

$E_2/\text{GPa}$	$K_1$			
	$\nu_2 = 0.2$	$\nu_2 = 0.25$	$\nu_2 = 0.3$	$\nu_2 = 0.35$
10	1.097 2	1.090 8	1.084 5	1.078 5
20	1.161 4	1.156 1	1.151 0	1.145 9
30	1.184 6	1.179 9	1.175 1	1.170 5
40	1.196 6	1.192 1	1.187 6	1.183 2
50	1.203 9	1.199 5	1.195 2	1.191 0

分析表 1 弹性模量和泊松比对  $k_1$  参数灵敏度表明，岩石泊松比增大  $k_1$  减小，弹性模量增大  $k_1$  增大，在弹性模量为 50 GPa，泊松比为 0.2 时， $k_1$  最大为 1.203 9；在弹性模量为 10 GPa，泊松比为 0.35 时， $k_1$  最小为 1.078 5。 $k_1$  取值范围为 1.078 5~1.203 9。随着弹性模量增大  $k_1$  不断增大，随着泊松比不断增大  $k_1$  不断减小，因此  $k_1$  与弹性模量成正比，与泊松比成反比。 $k_1$  值接近 1.1 条件下，当取一个常数值时，例如 1.14，引起的最大误差为 7%。B. Amadei 和 O. Stephansson<sup>[14]</sup>提出空心包体地应力测量即使在理想的岩石条件下，数据处理带来的误差至少在 10%~

20%；J. Sjöberg 和 H. Klasson<sup>[15]</sup>提出仪器引起的误差也大于 10%。因此  $k_1$  引起的误差计算完全可以接受。

加入  $k_1$  系数后的表达式为

$$(\varepsilon_\theta + 2\varepsilon_a) = k_1 \frac{R^2}{R^2 - r^2} \left[ \frac{p}{K_0} - \frac{p}{K_0(bK_0 + 1)} + \frac{a}{(bK_0 + 1)^2} \ln \frac{aK_0 + (bK_0 + 1)p}{aK_0} \right] \quad (28)$$

$$(\varepsilon_\theta - \varepsilon_a) = k_1 \frac{3R^2}{2(R^2 - r^2)} \left[ \frac{p}{K_0} - \frac{p}{K_0(dK_0 + 1)} + \frac{c}{(dK_0 + 1)^2} \ln \frac{cK_0 + (dK_0 + 1)p}{cK_0} \right] \quad (29)$$

### 3 三山岛金矿花岗岩解除岩芯高压双轴试验工程应用

应用空心包体应变计方法在山东莱州三山岛金矿进行了地应力测量。三山岛金矿测量深度为 795 和 825 m，获得采集数据，之后对解除岩芯进行双轴加压测试。因为 -825 m 水平的数据异常，只对 -795 m 水平解除岩芯进行了双轴加压测试。解除岩芯参数如表 2 所示。每个解除岩芯进行了加卸载试验，试验数据如图 8 所示。图 9 为 3 组应变片各个方向上平均值的数据。线性拟合平均应变如图 10 所示。估测地应力大小后确定最大径向围压。

表 2 解除岩芯和 CSIRO 参数

Table 2 Parameters of rock cores and CSIRO cells

岩性	R/mm	R <sub>1</sub> /mm	R <sub>2</sub> /mm	E <sub>1</sub> /GPa	ν <sub>1</sub>	ρ/mm
花岗岩	55	15.5	19	3	0.29	17.5

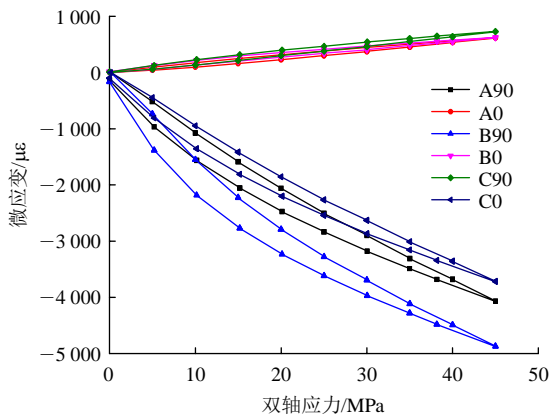


图 8 -795 m 花岗岩双轴加卸载试验结果

Fig.8 Results from biaxial load-unload testing of granite core (-795 m depth)

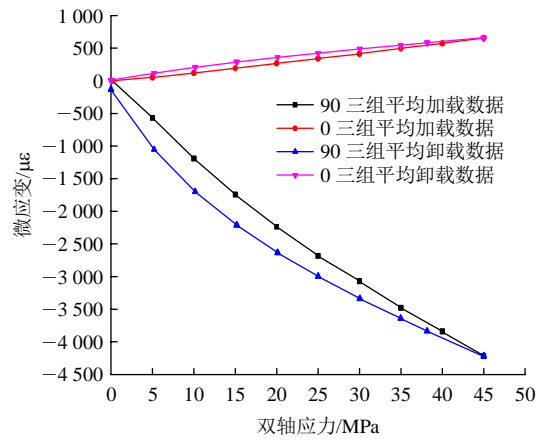


图 9 -795 m 花岗岩双轴加卸载三组应变片平均数据

Fig.9 The average strains from biaxial load-unload testing of granite core(-795 m depth)

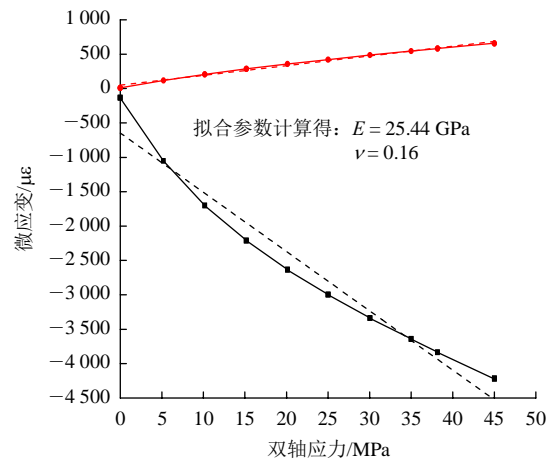


图 10 花岗岩卸载数据岩线性拟合

Fig.10 Linear fittings of the average unloading strains(granite core)

对原始卸载数据进行处理后，计算出每 5 MPa 范围内的体积模量  $K$  和剪切模量  $G$  值，平均应力计算式见式(18)，具体数值见表 3。利用式(4)和(5)计算出的体积模量和剪切模量曲线如图 11 和 12 所示。

表 3 非线性拟合参数

Table 3 Parameters resulting from nonlinear fittings

平均应力/MPa	体积模量 K/MPa	剪切模量 G/MPa
27.72	21.760	17.07
24.38	20.630	15.56
21.67	19.770	15.55
18.34	18.170	14.06
15.03	15.720	13.05
11.76	13.200	11.33
8.44	10.940	9.62
5.12	8.015	7.64
1.73	5.580	5.75

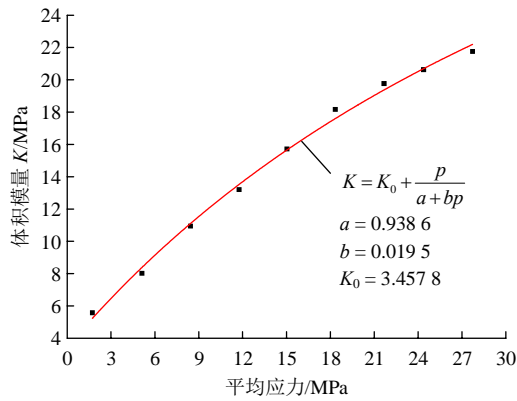


图 11 体积模量与平均应力非线性拟合

Fig.11 Nonlinear fitting of bulk modulus vs the mean stress

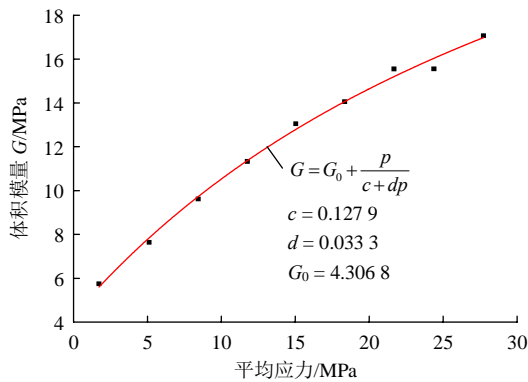
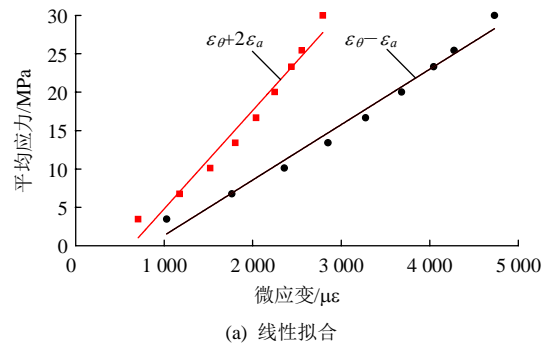


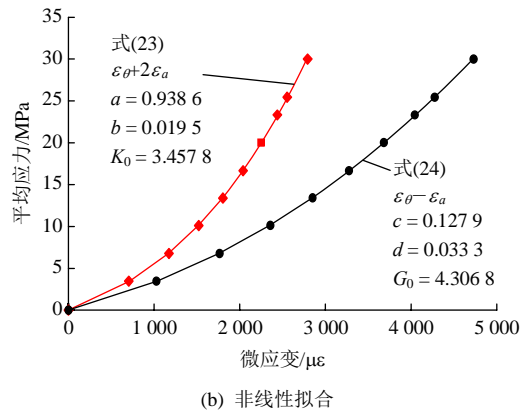
图 12 剪切模量与平均应力非线性拟合

Fig.12 Nonlinear fitting of shear modulus vs the mean stress

图 13 为平均应力与应变的拟合, 其中, 非线性拟合参数见表 4。三山岛金矿花岗岩 CSIRO 解除岩芯双轴加载试验最大径向压力为 40 MPa, 卸载数据非线性特征突出, 非线性关系式拟合度很高, 表 5 为不同拟合方法的结果和方差。分析表中结果可知, 线性拟合试验数据方差较大, 且随着压力越大即平均应力增大, 方差的增幅越大, 拟合效果很不理想。



(a) 线性拟合



(b) 非线性拟合

图 13 花岗岩岩芯平均应力与应变的拟合

Fig.13 Fittings of mean stress with strain of granite core

表 4 非线性拟合参数

Table 4 Parameters resulting from nonlinear fittings

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>K</i> <sub>0</sub>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>G</i> <sub>0</sub>
0.938 6	0.019 5	3.457 8	0.127 9	0.033 3	4.306 8

所提出的非线性方法拟合方差很小, 拟合度很高, 适用高压双轴试验数据的处理。

岩石和环氧树脂具有不同弹性特性, *k*<sub>1</sub> 可以通过式(25)计算。根据线弹性假设, *k*<sub>1</sub> 是一个常数。

表 5 花岗岩线性拟合和非线性拟合误差对比

Table 5 Deviation comparison of linear and nonlinear fittings(granite core)

平均应力/MPa	$\epsilon_\theta + 2\epsilon_a$	$\epsilon_\theta - \epsilon_a$	线性拟合						非线性拟合					
			<i>E</i> /GPa	$\nu$	$\epsilon_\theta + 2\epsilon_a$	$\Delta_1$	$\epsilon_\theta - \epsilon_a$	$\Delta_2$	<i>K</i> /GPa	<i>G</i> /GPa	$\epsilon_\theta + 2\epsilon_a$	$\Delta_3$	$\epsilon_\theta - \epsilon_a$	$\Delta_4$
30.00	2 792	4 730			2 732	60	4 661	69	24.25	17.96	2 783	9	4 723	7
25.44	2 554	4 275			2 317	237	3 952	323	21.80	16.59	2 558	-4	4 274	1
23.32	2 437	4 043			2 124	313	3 623	420	20.60	15.90	2 445	-7	4 051	-8
20.02	2 248	3 681	25.44	0.16	1 823	425	3 110	571	18.65	14.74	2 254	-6	3 685	-3
16.67	2 038	3 275			1 518	520	2 589	686	16.56	13.45	2 037	1	3 279	-4
13.41	1 803	2 850			1 221	582	2 083	767	14.42	12.07	1 798	5	2 844	6
10.12	1 520	2 356			922	599	1 572	784	12.13	10.53	1 516	4	2 349	7
6.77	1 173	1 764			617	556	1 052	711	9.66	8.80	1 166	7	1 758	5
3.47	705	1 027			316	389	539	488	7.07	6.88	715	-10	1 038	-11

注:  $\Delta_1$  和  $\Delta_3$  分别为  $\epsilon_\theta + 2\epsilon_a$  线性拟合和非线性拟合残余误差平方和;  $\Delta_2$  和  $\Delta_4$  分别为  $\epsilon_\theta - \epsilon_a$  线性拟合和非线性拟合残余误差平方和。

因为非线性复杂的函数拟合会发生误差, 由表 6 可以看出  $k_1$  的取值对模量不敏感, 因此  $k_1$  可以根据不同剪切模量值分段的方式确定, 见表 7。

表 6 体积模量和剪切模量对  $k_1$  敏感度  
Table 6 Sensitivity of  $k_1$  to bulk and shear modulus

G/GPa	$k_1$			
	K = 5 GPa	K = 10 GPa	K = 15 GPa	K = 20 GPa
5	1.120 5	1.114 7	1.112 3	1.111 1
10	-	1.176 9	1.171 4	1.168 3
15	-	-	1.197 0	1.192 5
20	-	-	1.212 7	1.207 3

由表 7 可知, 分段线性计算的数值  $k_1$  最大为 1.080 5, 最小值为 1.077 5; 一次线性计算所得  $k_1$  值为 1.073 2。分段线性计算参数  $k_1$  对计算结果精度提高不大, 因此在实际计算中可以根据具体情况将  $k_1$  取为常数。

深部花岗岩解除岩芯双轴加压试验数据处理结果显示, 所提出的非线性拟合精度更高。如果考虑环氧树脂胶厚度和应变片相对于安装小孔表面的位置, 变形模量会大约下降 10%。根据高压双轴压力测试的数据提出的解决方法更适合于岩芯非线性特

性的描述。

## 4 结 论

现场应力测量是地下工程勘察和设计最重要的方面之一。随着对地球深部开发的不断加深, 岩体非线性行为表现得尤为突出, 应用线弹性理论假设计算的地应力结果误差较大。

(1) 研发一套高压双轴加载试验仪器, 该仪器具有高压加载性能、且能适用多种直接的解除岩芯、进行长期加载试验等优点。对三山岛金矿原位测量解除岩芯进行了标定试验, 试验中 CSIRO 应变计被黏在解除岩芯的小孔中, 将岩石非线性行为引入变形模量中, 提出了平均应力与体积模量和剪切模量的非线性双曲线方程, 并在解除岩芯的双轴加载试验数据处理过程中应用此方程, 分析了围压与卸载回弹应变的非线性关系。对比了线性和非线性关系处理试验数据的结果, 得出非线性比线性具有更好的拟合度。处理结果的误差更小。

(2) 在考虑环氧树脂胶厚度时, 为了消除其误差, 引入参数  $k_1$ , 且  $k_1$  对体积模量和剪切模量不敏感, 因此对  $k_1$  采取分段线性拟合的方法确定, 并确定了三山岛金矿解除岩芯  $k_1$  取值。

表 7 线性和非线性拟合系数  $k_1$  误差对比

Table 7 Deviation comparison of linear and nonlinear fittings with consideration of factor  $k_1$

岩性	平均应力/MPa	线性拟合					非线性拟合				
		E/GPa	$\nu$	K/GPa	G/GPa	$k_1$	E/GPa	$\nu$	K/GPa	G/GPa	$k_1$
	30.00						43.22	0.20	24.25	17.96	1.080 5
	25.44						39.70	0.20	21.80	16.59	1.080 7
	23.32						37.94	0.19	20.60	15.90	1.080 4
	20.02						35.00	0.19	18.65	14.74	1.080 3
花岗岩	16.67	25.44	0.16	13.38	11.77	1.0732	31.75	0.18	16.56	13.45	1.079 9
	13.41						28.31	0.17	14.42	12.07	1.079 1
	10.12						24.51	0.16	12.13	10.53	1.077 3
	6.77						20.24	0.15	9.66	8.80	1.072 0
	3.47						15.58	0.13	7.07	6.88	1.077 5



**参考文献(References):**

- [1] 康红普, 林建, 张晓. 深部矿井地应力测量方法研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 929 - 933.(KANG Hongpu, LIN Jian, ZHANG Xiao. Research and application of in-situ stress measurement in deep mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 929 - 933.(in Chinese))
- [2] ZANG A, STEPHANSSON O, HEIDBACH O, et al. World stress map database as a resource for rock mechanics and rock engineering[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2012, 30: 625 - 646. Doi: 10.1007/s10706 - 012 - 9505 - 6.
- [3] SJÖBERG J, CHRISTIANSSON R, HUDSON J A. ISRM suggested methods for rock stress estimation-part 2: overcoring methods[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40: 999 - 1 010. Doi: 10.1016/j.ijrmms.2003.07.012
- [4] 蔡美峰. 地应力测量中温度补偿方法的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(3): 227 - 235.(CAI Meifeng. Studies of temperature compensation techniques in rock stress measurements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(3): 227 - 235.(in Chinese))
- [5] 白金朋, 彭华, 马秀敏, 等. 深孔空心包体法地应力测量仪及其应用实例[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 902 - 908.(BAI Jinpeng, PENG Hua, MA Xiumin, et al. Hollow inclusion strain gauge geostress measuring instrument in deep borehole and its application example[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 902 - 908.(in Chinese))
- [6] MAJTENYI S I, DESAI C S, HOLLOWAY D M. Discussion of nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 96(5): 815 - 820.
- [7] KULHAWY F H, DUNCAN J M. Stresses and movements in Oroville dam[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, 98(4): 653 - 655.
- [8] EXADAKTYLOS G E. Nonlinear rock mechanics[M]. New York: Springer, 2006: 71 - 90.
- [9] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2 162 - 2 178.(XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2 162 - 2 178.(in Chinese))
- [10] 蔡美峰, 刘卫东, 李远. 玲珑金矿深部地应力测量及矿区地应力场分布规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 227 - 233.(CAI Meifeng, LIU Weidong, LI Yuan. 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, 2010, 29(2): 227 - 233.(in Chinese))
- [11] 葛修润, 侯明勋. 钻孔局部壁面应力解除法(BWSRM)的原理及其在锦屏二级水电站工程中的初步应用[J]. 中国科学, 2012, 42(4): 939 - 949.(GE Xiurun, HOU Mingxun. Principle of in-situ 3D rock stress measurement with borehole wall stress relief method and its preliminary applications to determination of in-situ rock stress orientation and magnitude in Jinping hydropower station[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 42(4): 939 - 949.(in Chinese))
- [12] 皇甫琪. 非线性岩体地应力场迭代拟合算法研究[M]. 北京: 北京科技大学, 2016: 55 - 58.(HUANGFU Qi. Research on iteration fitting algorithm of In-situ stress field of nonlinear rock mass[M]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016: 55 - 58.(in Chinese))
- [13] DUNCAN FAMA M E, PENDER M J. Analysis of the hollow inclusion technique for measuring In Situ rock stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1980, 17(3): 137 - 146.
- [14] Bernard Amadei. Rock stress and its measurement[M]. Boulder: University of Colorado, Boulder, USA, 1997: 95 - 100.
- [15] SJÖBERG J, KLASSON H. Stress measurements in deep boreholes using the Borre(SSPB) probe[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(7): 1 205 - 1 223.