



移动阅读

乔兰,张亦海,孔令鹏,等. 基于分段解除的深部空心包体应变计中非线性优化算法[J]. 煤炭学报,2019,44(5):1306-1313. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.6017

QIAO Lan,ZHANG Yihai,KONG Lingpeng,et al. Non-linear optimization algorithm of hollow inclusion strain gauge measurement in deep rock based on section relieve[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(5):1306-1313. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.6017

基于分段解除的深部空心包体应变计中非线性优化算法

乔 兰,张亦海,孔令鹏,李 远

(北京科技大学 土木与资源工程学院,北京 100083)

摘 要:随着浅部资源的日益枯竭,地下开采的深度不断增大,千米级乃至更深的矿产资源开采已成为常态。因此弄清深部岩体原岩应力的赋存环境是至关重要的,目前CSIRO地应力测量作为国际岩石力学学会建议直接测量方法,在世界各地广泛使用。在浅部岩体空心包体应变计地应力测量解析式中,弹性模量和泊松比都是通过室内双轴加载数据拟合获得的常数。进入深部岩体表现出高度的非线性,在对解除岩芯进行高压双轴加卸载试验中发现围压与应变的关系非线性,并且随着围压不断增大非线性关系尤为突出。传统的双轴加载试验设备最大围压加载值试验室内测得20 MPa,不能满足深部岩体解除岩芯的高压双轴试验模拟解除岩石在深部所受的应力环境。因此对传统的设备进行改造,研发了一套高压双轴加载试验装置,所承受的理论最大径向压力为200 MPa以上,目前试验测试的最大围压为100 MPa。对三山岛金矿埋深800 m的解除岩芯进行了高压双轴加卸载试验,分析应力与应变的关系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,明确了模型中3个拟合参数的物理意义,推导出平均应力与应变之间的非线性关系特征公式。基于弹性力学理论原岩应力分量计算在不考虑解除路径时,应用最小二乘法进行计算后获得最大主应力大小为53.11 MPa,西北312°,倾角为8°。本文提出的考虑解除路径的优化算法,将整个解除过程分成多个阶段,每个阶段的变形模量计算参数与解除岩芯所受应力状态有关,且符合推导的应力与应变的非线性关系公式,各个阶段叠加计算的最大主应力大小为47.78 MPa,西北311°,倾角为5°。

关键词:岩石非线性;空心包体;地应力测量;计算方法

中图分类号:TU45;TD313

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2019)05-1306-08

Non-linear optimization algorithm of hollow inclusion strain gauge measurement in deep rock based on section relieve

QIAO Lan,ZHANG Yihai,KONG Lingpeng,LI Yuan

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

Abstract: Deep mining is gradually becoming more prevalent owing to the lack of shallow mineral resources. In the deep underground, the geological environment becomes complex, particularly has high in-situ stress. The CSIRO in-situ stress measurement method, as the international society for rock mechanics suggested as direct measurement method, is widely used all over the world. In shallow parsing type hollow inclusion strain gauge in-situ stress measurement of rock mass, the elastic modulus and Poisson's ratio are obtained from the indoor biaxial loading data fitting of constant. In

收稿日期:2018-12-20 修回日期:2019-04-02 责任编辑:常 琛

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600703)

作者简介:乔 兰(1963—),女,河北衡水人,教授,博士生导师。E-mail:lanqiao@ustb.edu.cn

通讯作者:李 远(1980—),男,辽宁沈阳人,副教授。E-mail:liyuan@ustb.edu.cn

the deep rock mass showing the highly nonlinear, it is found that the relation between confining pressure and strain is nonlinear in the high pressure biaxial loading and unloading test, and the nonlinear relation is especially prominent as the confining pressure increases. The maximum confining pressure of the traditional biaxial loading test equipment is 20 MPa. It can not satisfy the high pressure biaxial test simulation of deep rock core release. Thus the traditional equipment is transformed to develop a set of high pressure biaxial loading test device. The theoretical maximum radial pressure is over 200 MPa, and the maximum confining pressure tested in the current test is 100 MPa. Based on the research and development of a set of high pressure biaxial loading test device, a high pressure biaxial loading-unloading test is carried out on the core of Sanshandao Gold Mine with a depth of 800 m. By analyzing the relationship between stress and strain, a non-linear hyperbola model between the mean stress vs volume modulus and shear modulus is proposed, the physical significance of the three fitting parameters in the model is defined, and the characteristic formula of the non-linear relationship between average stress and strain is derived. Based on the elastic mechanics theory, the maximum main in-situ stress without considering relieved strain path is 53.11 MPa, its direction is 312° , and dip angle is 8° after the application of least square method to calculate. The optimization algorithm proposed in this paper takes the relieved strain path into consideration and divides the entire decommissioning process into multiple stages. The calculated parameters of elastic modulus and Poisson's ratio at each stage are related to the stress state of the core, and conform to the deduced non-linear relation formula of stress and strain. The maximum principal stress of each stage superposition calculation of is 47.78 MPa, its direction is 311° , and dip angle is 5° .

Key words: rock non-linear; CSIRO; In-situ stress measurement; calculation method

目前我国已有大部分矿井进入千米以下开采深度。随着开采深度增加,深部岩体所赋存的地质条件复杂,其地应力场的分布特征与浅部岩体存在显著的差异性。初始地应力是影响岩体围岩稳定的重要因素,地应力或原岩应力即储存在岩体中未受扰动的应力,它不仅是影响岩体力学行为的主要控制因素,同时也是引起岩体变形和破坏的力源之一。国际岩石力学学会推荐的主要地应力测量方法^[1]:定性估税法、套孔解除法、水压致裂法、定量估税法4种方法。套孔解除法中以澳大利亚 CSIRO 型空心包体应变计测量方法应用最为普遍,应变计由环氧树脂胶胶结在试验钻孔内壁上,待胶固化后再套钻钻取含有应变计的小钻孔,钻取过程中不断采集解除应变^[2-3]。

近些年众多机构对空心包体应变计结构、选材、制作工艺、温度补偿、围压试验和计算方法等多个方面进行了研究改进。李远等^[4-5]提出了一种基于双温度补偿方法消除测量过程中温度对采集精度的影响,并且研发了一款数字化断电续采型无导线空心包体应变计。闫振雄等^[6]采用线性参数的最小二乘拟合方法对地应力分量计算公式进行了推导,得出了地应力分量的改进算法及其标准误差的计算公式。董诚、王连婕等^[7]空心包体三轴地应力测量系统的升级改造,研制了一套小型化、自动化的新型地应力测量系统,在某煤矿地应力测量中得到应用。王衍森和吴振业^[8]推导出空心包体应变计在一定的布片方式下应变测值间的内在关系式,并由此提出了应变测值

的直接检验法及应变计的最佳布片方式。刘少伟等^[9]设计了一种使用 DS18B20 作为敏感元件的测温电路系统,经实验室试验校核并在煤矿现场进行了应用。中国地质科学院地质力学研究所彭华等^[10]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其计算结果带来的影响。

在岩体非线性研究领域 DUNCAN 和 CHANG^[11]在 1970 年提出了一种非线性材料模型,且 1972 年 KULHAWY 和 DUNCAN^[12]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。席道瑛等^[13-14]引入一种滞后非线性弹性材料的宏观模型——Preisach-Mayergoyz 模型(PM 模型)。孔志鹏等^[15]提出一种岩石材料非线性三参数强度准则,待定系数 A, B, C 可通过简单的试验确定且具有明确的物理意义。

因此由岩体线弹性假设为前提的当前地应力测量理论在深部岩体地应力测量中将产生较大偏差,基于对深部地应力场与浅部地应力场分布特征的差异性的基本认识,深入探索随深度增加地应力场从由线性岩层向非线性岩层过渡的发展规律和原位特征^[19]。在现有地应力测量理论上发展基于岩体非线性特征的测量理论,并在此理论指导下考虑深部岩体高应力下应力-应变非线性规律,发展适合深部岩体地应力测量的新理论、新方法。本文在研发了适用于多尺寸解除岩芯的高压双轴加载系统基础上,三山岛金矿埋

深 800 m 的解除岩芯进行了双轴加卸载试验,处理试验数据后,提出了一种变形模量与平均应力的双曲线模型,推导了双轴加卸载试验中的变形与平均应力之间的非线性关系。将整个解除过程分成多个阶段,每个阶段的变形模量计算参数与解除岩芯所受应力状态有关,且符合推导的应力与应变的非线性关系公式,各个阶段叠加计算出最大水平主应力。

1 解除岩芯双轴加卸载试验

蔡美峰^[16]提出了将双轴加卸载试验中卸载应变数据的用于计算岩体的力学参数弹性模量和泊松比。锦屏水电站^[17]和玲珑金矿^[18]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的。传统的双轴加载试验设备最大围压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 1 所示。

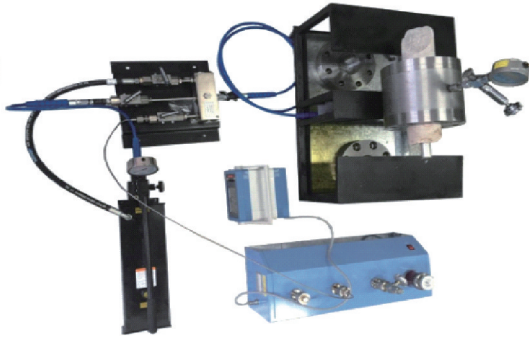


图 1 高压双轴试验仪器

Fig. 1 High pressure biaxial test equipments

双轴加卸载试验具体过程为:径向围压采用手动压力泵逐步地加载,最初数值为零即不受力状态,每 2 MPa 为一个梯度,保持压力状态,连续记录 3 次 3 组应变片 12 个应变片数据,最大压力加载到 16 MPa,然后按同样的方式进行卸载试验,加卸载试验数据如图 2 所示。

双轴加载试验数据用于确定解除岩芯的计算参数弹性模量和泊松比。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。在实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,弹性模量计算公式如下:

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

泊松比 ν 计算公式如下:

$$\nu = -\varepsilon_a / \varepsilon_\theta \quad (2)$$

式中, ε_a 为 3 组应变花轴向应变平均值; ε_θ 为 3 组应

变花环向应变平均值(压缩应力为正); σ_r 为径向压力(压缩应力为正); R 和 r 分别为解除岩芯外半径和小孔半径。

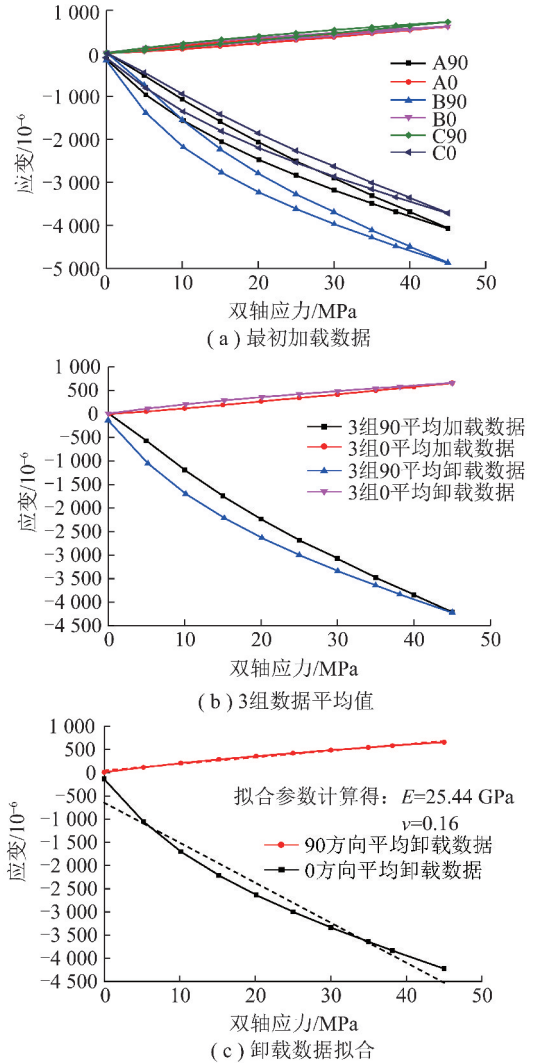


图 2 双轴加卸载试验应力应变数据

Fig. 2 Biaxial loading-unloading test stress vs strain

对原始卸载数据进行处理后,计算出每 5 MPa 范围内的弹性模量 E 和泊松比 ν ,在根据式(3)和(4)计算对应的体积模量 K 和剪切模量 G 值(表 1)。双轴加卸载试验中岩芯的平均应力在不断变化,因此应力-应变曲线每阶段的最大值就算出对应的平均应力值,如式(5)所示:

$$K = E / [3(1 - 2\nu)] \quad (3)$$

$$G = E / [2(1 + \nu)] \quad (4)$$

$$P = 2\sigma_r / 3 \quad (5)$$

将体积模量和平均应力以及剪切模量与平均应力的关系选取双曲线模型拟合,拟合公式见式(6)和(7),图 3 和 4 相关系数分别为 0.989 和 0.997,因此所应用的双曲线模型可以很好地用来表达变形模量和平均应力的关系(表 2)。

表 1 试验参数计算值

Table 1 Test parameters calculated value

平均应力/MPa	体积模量 K /GPa	剪切模量 G /GPa
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

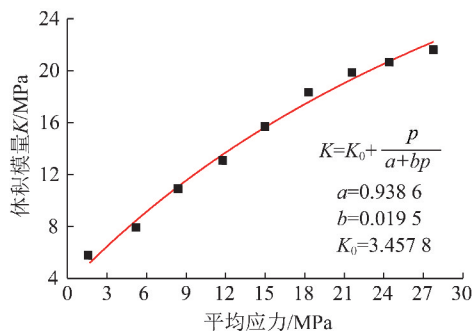


图 3 体积模量与平均应力拟合

Fig. 3 Fitting curve of bulk modulus vs the mean stress

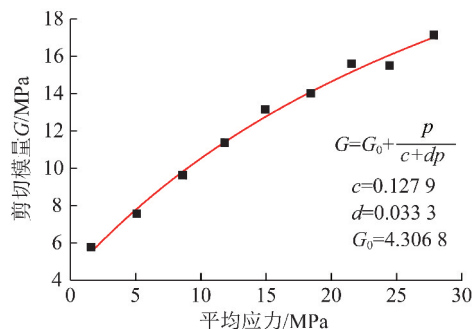


图 4 剪切模量与平均应力拟合

Fig. 4 Fitting curve of shear modulus vs the mean stress

表 2 非线性拟合参数

Table 2 Nonlinear fitting parameters

a	b	K_0	c	d	G_0
0.9386	0.0195	3.4578	1.279	0.0333	4.3068

$$K = K_0 + \frac{p}{a + bp} \quad (6)$$

$$G = G_0 + \frac{p}{c + dp} \quad (7)$$

式中, p 为平均应力; K_0 和 G_0 为初始的体积模量和剪切模量, 即当 $p=0$, K 和 G 的值; 参数 a, b, c, d 按以下定义:

$$\frac{1}{a} = \left. \frac{dK}{dp} \right|_{p=0} \quad (8)$$

$$\frac{1}{b} = K \Big|_{p=\infty} - K_0 \quad (9)$$

$$\frac{1}{c} = \left. \frac{dG}{dp} \right|_{p=0} \quad (10)$$

$$\frac{1}{d} = G \Big|_{p=\infty} - G_0 \quad (11)$$

2 非线性应力应变关系推导

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(2)用增量形式改写成以下形式:

$$E = \frac{\Delta\sigma_r}{\Delta\varepsilon_\theta} \frac{2R^2}{R^2 - r^2} \quad (12)$$

$$\nu = -\frac{\Delta\varepsilon_a}{\Delta\varepsilon_\theta} \quad (13)$$

式中, E 和 ν 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); R 和 r 分别为解除岩芯外半径和小孔半径; $\Delta\varepsilon_\theta$ 和 $\Delta\varepsilon_a$ 分别为 3 组应变花环向应变和轴向应变的平均值增量式。

将式(12)和(13)代入式(3)和(4)得

$$K = \frac{\Delta\sigma_r}{\Delta\varepsilon_\theta} \frac{2R^2}{R^2 - r^2} \cdot 3 \left(1 + 2 \frac{\Delta\varepsilon_a}{\Delta\varepsilon_\theta} \right) \quad (14)$$

$$G = \frac{\Delta\sigma_r}{\Delta\varepsilon_\theta} \frac{2R^2}{R^2 - r^2} \cdot 2 \left(1 - \frac{\Delta\varepsilon_a}{\Delta\varepsilon_\theta} \right) \quad (15)$$

在双轴加载试验中, 平均应力和径向应力的关系:

$$p = \frac{2\sigma_r}{3} \quad (16)$$

将式(16)代入式(14)和(15)化简得

$$K = \frac{\Delta p}{\Delta(\varepsilon_\theta + 2\varepsilon_a)} \frac{R^2}{R^2 - r^2} \quad (17)$$

$$G = \frac{3\Delta p}{2\Delta(\varepsilon_\theta - \varepsilon_a)} \frac{R^2}{R^2 - r^2} \quad (18)$$

将拟合公式(6)和(7)代入式(17)和(18)化简得

$$\Delta(\varepsilon_\theta + 2\varepsilon_a) = \frac{(a + bp)\Delta p}{aK_0 + (bK_0 + 1)p} \frac{R^2}{R^2 - r^2} \quad (19)$$

$$\Delta(\varepsilon_\theta - \varepsilon_a) = \frac{(c + dp)\Delta p}{cK_0 + (dK_0 + 1)p} \frac{3R^2}{2(R^2 - r^2)} \quad (20)$$

对式(19)和(20)两边积分得

$$\varepsilon_{\theta} + 2\varepsilon_a = \frac{R^2}{R^2 - r^2} \left[\frac{bp}{bK_0 + 1} + \frac{a}{(bK_0 + 1)^2} \times \ln \frac{aK_0 + (bK_0 + 1)p}{aK_0} \right] \quad (21)$$

$$\varepsilon_{\theta} - \varepsilon_a = \frac{3R^2}{2(R^2 - r^2)} \left[\frac{dp}{(dG_0 + 1)} + \frac{c}{(dG_0 + 1)^2} \times \ln \frac{cG_0 + (dG_0 + 1)p}{cG_0} \right] \quad (22)$$

图5应变与应力关系图中,由线性拟合和非线性拟合结果分析可得,随着平均应力不断增大,所提出的非线性关系公式更适合应力与应变的关系。

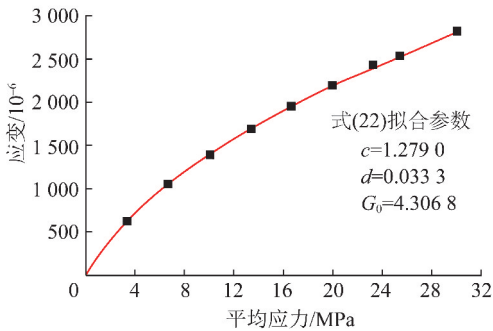
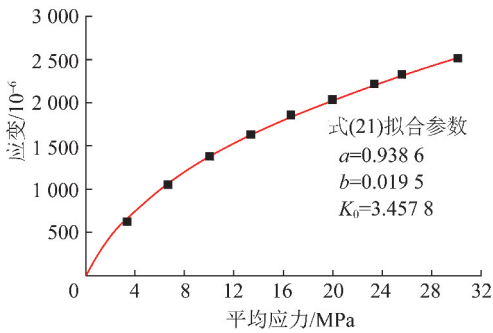


图5 应变与应力之间关系

Fig. 5 Relationship between strain and stress

3 考虑解除路径的的应力分量计算

孔壁应变片为平面应力状态如图6所示,只有 σ_{θ} , σ_z , $\tau_{\theta z}$ 三个应力分量,每个电阻应变花的4支应变片所测应变值为 ε_{θ} , ε_z , ε_{45} , ε_{-45} 即(ε_{135})和它们的关系式为

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{E}(\sigma_{\theta} - \nu\sigma'_z) \quad (23)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma'_z - \nu\sigma_{\theta}) \quad (24)$$

$$\gamma_{\theta z} = \frac{\tau_{\theta z}}{G} \quad (25)$$

将6个应力分量 σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} 替换极坐标中 σ_{θ} , σ_z , $\tau_{\theta z}$ 三个应力分量,公式变为

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{E} \{ (\sigma_x + \sigma_y) + 2(1 - \nu^2) [(\sigma_y - \sigma_x) \times \cos 2\theta - 2\tau_{xy} \sin 2\theta] - \nu\sigma_z \} \quad (26)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (27)$$

$$\gamma_{\theta z} = \frac{4}{E} (1 + \nu) (\tau_{yz} \cos \theta - \tau_{zx} \sin \theta) \quad (28)$$

$$\varepsilon_{\pm 45} = \frac{1}{2} (\varepsilon_{\theta} + \varepsilon_z \pm \gamma_{\theta z}) \quad (29)$$

其中, ε_{θ} , ε_z , $\gamma_{\theta z}$ 分别为空心包体应变计所测环向应变,轴向应变和剪切应变值。

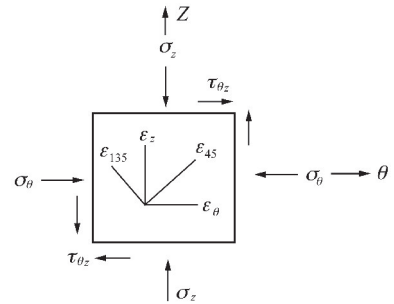


图6 应变片受力状态示意

Fig. 6 Stress state of strain gauge

3组应变片成120°胶粘与小孔内壁,应变花顺时针顺序为A-B-C。以A组应变片为例,1片为环向应变片记为A90;2片为轴向应变片记为A0;3和4片分别与钻孔轴线成±45°,记为A45, A135。如图7所示。

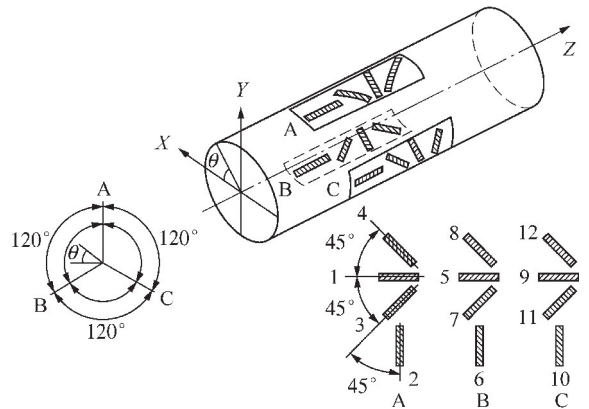


图7 空心包体应变计应变花粘贴位置

Fig. 7 Hollow inclusion strain gauge location

如图8中CSIRO解除过程中各个通道应变中所标注,装有空心包体应变计的小孔在岩芯从开始解除到解除完成的过程中,钻机以恒定的推力及恒定转速进行钻取,保证解除数据的稳定性,间隔1 min进行一次应变数据采集,应变片从开始变化到最后稳定总共持续了8 min。因此解除全过程分成8个阶段(表3),每个阶段的微应变增量见表4,每个阶段微应变相加得最后的总应变值。

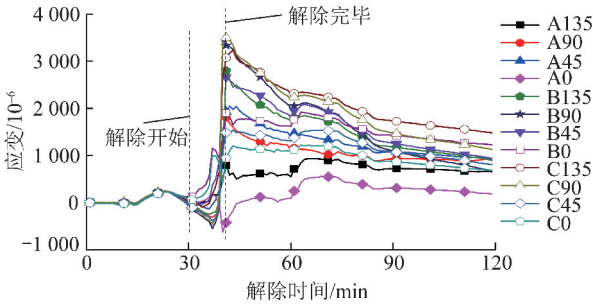


图8 CSIRO 解除过程中各个通道应变

Fig. 8 Each channel strain of CSIRO

表3 3组应变片的计算参数

Table 3 Calculation parameters of three groups

of strain gauge					
应变花	$\theta/(\circ)$	$\sin \theta$	$\sin 2\theta$	$\cos \theta$	$\cos 2\theta$
A组	90	1.0	0	0	-1.0
B组	-30	-0.5	-0.866	0.866	0.5
C组	210	-0.5	0.866	-0.866	0.5

3.1 最小二乘数值优化算法

3组应变花的12支应变片可以获得12个方程,但只有6个未知数,属于超定方程组,利用最小二

表4 空心包体应变计解除过程应变增量

Table 4 Strain increment of the hollow inclusion strain gauge during the unloading process

解除阶段	A135	A90	A45	A0	B135	B90	B45	B0	C135	C90	C45	C0
Δ_8	12	69	33	97	9	42	29	178	4	81	66	116
Δ_7	76	22	110	51	97	140	51	290	305	461	45	199
Δ_6	37	235	202	72	202	236	72	194	201	326	229	137
Δ_5	45	298	315	24	299	323	322	408	266	368	248	176
Δ_4	131	220	330	24	271	427	172	173	215	415	220	113
Δ_3	228	370	446	89	372	960	413	164	830	754	252	177
Δ_2	179	507	246	71	1 174	930	1 289	150	1 004	847	319	130
Δ_1	91	161	239	10	376	275	318	359	245	238	116	219
$\sum_{i=1}^8 \Delta_i$	799	1 882	1 921	438	2 800	3 333	2 666	1 916	3 070	3 490	1 495	1 267

乘法计算6个应力分量。

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \beta_j = y_i, (i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (30)$$

其中, m 代表有 m 个等式; n 代表有 n 个未知数 β , 且 $m > n$; 将其进行向量化后为

$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (31)$$

引入残差平方和函数 S

$$S(\boldsymbol{\beta}) = \|\mathbf{X}\boldsymbol{\beta} - \mathbf{y}\|^2 \quad (32)$$

当 $\boldsymbol{\beta} = \hat{\boldsymbol{\beta}}$ 时, $S(\boldsymbol{\beta})$ 取最小值, 记作:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = \operatorname{argmin}(S(\boldsymbol{\beta})) \quad (33)$$

通过对 $S(\boldsymbol{\beta})$ 进行微分求最值, 可以得到

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}} = \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (34)$$

如果矩阵 $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ 非奇异则 $\boldsymbol{\beta}$ 有惟一解:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (35)$$

应用最小二乘算法优化, 将基于双温度补偿算法的完全补偿修正应变值代入原岩应力计算公式中, 计算出原岩应力6个分量见表5。通过坐标公式的转换得到最大水平应力分量, 最小水平应力分量以及第二主应力分量的大小、方向和倾角。

表5 最小二乘法应力数值求解

Table 5 Stress values of the least squares method

$\sigma_x/$ MPa	$\sigma_y/$ MPa	$\sigma_z/$ MPa	$\tau_{xy}/$ MPa	$\tau_{yz}/$ MPa	$\tau_{zx}/$ MPa	σ_1			σ_2			σ_3		
						大小/ MPa	方向/ ($^\circ$)	倾角/ ($^\circ$)	大小/ MPa	方向/ ($^\circ$)	倾角/ ($^\circ$)	大小/ MPa	方向/ ($^\circ$)	倾角/ ($^\circ$)
49.16	33.84	31.66	-0.35	4.83	-8.86	53.11	312	8	35.91	210	61	25.62	208	5

3.2 考虑解除岩芯受力状态的应力计算

$$\varepsilon_\theta = \frac{3K + G}{9KG} \left\{ (\sigma_x + \sigma_y) + 2 \left[1 - \frac{(3K - 2G)^2}{(6K + 2G)^2} \right] \times \right.$$

$$\left. [(\sigma_y - \sigma_x) \cos 2\theta - 2\tau_{xy} \sin 2\theta] - \frac{3K - 2G}{6K + 2G} \sigma_z \right\} \quad (36)$$

$$\varepsilon_z = \frac{3K+G}{9KG} \left[\sigma_z - \frac{3K-2G}{6K+2G} (\sigma_x + \sigma_y) \right] \quad (37)$$

$$\gamma_{\theta z} = \tau_{yz} \cos \theta - \tau_{zx} \sin \theta / G \quad (38)$$

$$K = K_0 + p/b + ap \quad (39)$$

$$G = G_0 + p/d + cp \quad (40)$$

$$P = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / 3 \quad (41)$$

其中, K_0, a, b, G_0, c, d 通过高围压率定试验数据拟合获得。3组应变花测量结果共得到12个方程, 可以求解出原岩应力的6个分量。其中体积模量 K 和剪切模量 G 是关于原岩应力的函数。在解除过程的8个阶段中, 每个阶段都适用式(36)~(41), 且所求阶段的平均应力取值为前几个阶段的增量和。每个阶段的增量计算公式为

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{\theta_i} = & \frac{3K_i + G_i}{9K_i G_i} \left\{ (\Delta \sigma_{x_i} + \Delta \sigma_{y_i}) + \right. \\ & 2 \left[1 - \frac{(3K_i - 2G_i)^2}{(6K_i + 2G_i)^2} \right] \times \\ & \left. [(\Delta \sigma_{y_i} - \Delta \sigma_{x_i}) \cos 2\theta - 2\Delta \tau_{(xy)_i} \sin 2\theta] - \right. \\ & \left. \frac{3K_i - 2G_i}{6K_i + 2G_i} \Delta \sigma_{z_i} \right\} \quad (42) \end{aligned}$$

$$\Delta \varepsilon_{z_i} = \frac{3K_i + G_i}{9K_i G_i} \left[\Delta \sigma_{z_i} - \frac{(3K_i - 2G_i)}{(6K_i + 2G_i)} (\Delta \sigma_{x_i} + \Delta \sigma_{y_i}) \right] \quad (43)$$

$$\Delta \gamma_{(\theta z)_i} = (\Delta \tau_{(yz)_i} \cos \theta - \Delta \tau_{(zx)_i} \sin \theta) / G_i \quad (44)$$

$$K_i = K_0 + P_i/b + aP_i \quad (45)$$

$$G_i = G_0 + P_i/d + cP_i \quad (46)$$

$$P_i = \frac{\sum_{n=1}^i \sigma_{x(n-1)} + \sum_{n=1}^i \sigma_{y(n-1)} + \sum_{n=1}^i \sigma_{z(n-1)}}{3} \quad (47)$$

$$\begin{aligned} (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}) = & \sum_{n=1}^i (\Delta \sigma_{x_n}, \Delta \sigma_{y_n}, \\ & \Delta \sigma_{z_n}, \Delta \tau_{(xy)_n}, \Delta \tau_{(xz)_n}, \Delta \tau_{(yz)_n}) \quad (48) \end{aligned}$$

其中, i 为当前阶段数值, 当 i 为第1阶段时其应力状态为 $\sigma_{x0}, \sigma_{y0}, \sigma_{z0}$ 均为0, 平均应力受力 P 为0, 即岩芯已经完全解除, 解除岩芯处于不受力的状态, K 和 G 为初始值 K_0, G_0 , 参数 a, b, c, d 分别由高压双轴加载试验数据拟合获得, 每个阶段根据最小二乘法计算出其6个应力分量(表6)。

通过坐标公式的转换得到最大水平应力分量, 最小水平应力分量以及第二主应力分量的大小、方向和倾角见表7。

表6 各个阶段计算参数及应力分量计算值

Table 6 Calculation parameters and stress components in each stage

阶段	K	G	E	ν	$\Delta \sigma_x / \text{MPa}$	$\Delta \sigma_y / \text{MPa}$	$\Delta \sigma_z / \text{MPa}$	$\Delta \tau_{xy} / \text{MPa}$	$\Delta \tau_{yz} / \text{MPa}$	$\Delta \tau_{zx} / \text{MPa}$
Δ_8	19.95	15.50	36.92	0.19	-0.77	-1.13	1.85	-0.12	0.71	-0.02
Δ_7	19.95	15.50	36.92	0.19	-0.49	-0.44	4.18	0.05	0.48	0.09
Δ_6	18.20	14.39	34.16	0.19	0.56	-0.59	15.00	0.28	2.21	-0.42
Δ_5	16.61	13.37	31.62	0.18	1.30	2.38	-0.75	0.06	0.22	-0.85
Δ_4	15.73	12.80	30.20	0.18	5.23	3.85	-3.00	-0.86	-1.77	-1.77
Δ_3	10.82	9.52	22.08	0.16	38.22	23.64	4.93	1.25	2.28	-5.02
Δ_2	4.533 0	5.091 6	11.113 7	0.091 4	0.21	1.53	5.17	-0.43	0.18	-0.68
Δ_1	3.51	4.34	9.22	0.06	-0.17	-0.39	0.66	-0.04	0.25	0.34

表7 考虑解除路径的应力计算值

Table 7 Calculated stress value of the relief path is considered

σ_x / MPa	σ_y / MPa	σ_z / MPa	τ_{xy} / MPa	τ_{yz} / MPa	τ_{zx} / MPa	σ_1			σ_2			σ_3		
						大小/ MPa	方向/ (°)	倾角/ (°)	大小/ MPa	方向/ (°)	倾角/ (°)	大小/ MPa	方向/ (°)	倾角/ (°)
44.10	28.85	28.06	0.20	4.56	-8.32	47.78	311	5	31.35	214	58	21.86	206	6

4 结 论

(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。

(2) 对三山岛金矿埋深800 m 原位空心包体应变计地应力测量解除岩芯进行了双轴加卸载试验, 处

理试验数据后提出了平均应力与体积模量和剪切模量的非线性双曲线模型, 模型拟合曲线与数据之间的确定系数分别为0.989和0.997, 推导了双轴加卸载数据中平均应力与应变的非线性关系即式(19)和(20)。

(3) 对12组解除数据应用最小二乘法进行应力计算, 考虑了解除过程中, 岩芯的计算参数与岩芯解

除过程中受力状态相关,将整个解除应变按应变片采集的时间间隔进行分段,分段应用最小二乘法计算地应力值,结果表明根据解除路径确定每个阶段的变形模量计算的最大主应力数值要小于通过线性拟合双轴卸载试验数据求出弹性模量和泊松比的地应力计算值。

参考文献(References):

- [1] 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(7-8): 999-1010.
- [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(3): 625-646. doi:10.1007/s10706-012-9505-6.
- [3] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [4] 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.
- [5] 李远, 王卓. 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. Development of CSIRO cell with the compromised application of instantaneous datalogging, no-power data-connection and twin temperature compensation techniques[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(6): 1479-1487.
- [6] 闫振雄, 郭奇峰, 王培涛. 空心包体应变计地应力分量计算方法及应用[J]. *岩土力学*, 2018, 39(2): 725-721.
YAN Zhenxiong, GUO Qifeng, WANG Peitao. Calculation and application of in-situ stress components in hollow inclusion measurement [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(2): 725-721.
- [7] 董诚, 王连婕, 孙东生, 等. 空心包体三轴地应力测量系统的升级改造[J]. *实验技术与管理*, 2009, 26(1): 51-55.
DONG Cheng, WANG Lianjie, SUN Dongsheng, et al. The upgrading and improvement of hollow inclusion triaxial strain gauge for geostress measurement [J]. *Experimental Technology and Management*, 2009, 26(1): 51-55.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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 Jnpeng, 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.
- [11] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1970, 96(3): 1629-1653.
- [12] KULHAWY F H, DUNCAN J M. Stresses and movements in Oroville dam [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1972, 98(1): 653-655.
- [13] 席道瑛, 王鑫, 陈运平. 描写岩石非线性弹性滞后和记忆的宏观模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(20): 2212-2219.
XI Daoying, WANG Xin, CHEN Yunping. Macroscopic model of hysteresis and memory for the description of rock nonlinear elastic [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(20): 2212-2219.
- [14] 席道瑛, 陈运平, 陶月赞. 岩石的非线性弹性滞后特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(6): 1083-1096.
XI Daoying, CHEN Yunping, TAO Yuezan. Nonlinear elastic hysteric characteristics of rocks [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(6): 1083-1096.
- [15] 孔志鹏, 孙海霞, 陈四利. 岩石材料的一种非线性三参数强度准则及应用[J]. *岩土力学学报*, 2017, 38(12): 3524-3531.
KONG Zhipeng, SUN Haixia, CHEN Sili. A nonlinear tri-parameter strength criterion for rock materials and its application [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(12): 3524-3531.
- [16] 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.
- [17] 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): 359-368.
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): 359-368.
- [18] 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.
- [19] FANG Shulin, ZHANG Jian. In-situ measure to internal stress of shotcrete layer in soft-rock roadway [J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2014, 1(3): 321-328.