

# ASR 法在井下矿山地应力测试中的应用前景分析

孙东生<sup>1,2</sup>, 陈群策<sup>1,2</sup>, 张延庆<sup>1,2</sup>

SUN Dongsheng<sup>1,2</sup>, CHEN Qunce<sup>1,2</sup>, ZHANG Yanqing<sup>1,2</sup>

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 活动构造与地壳稳定性评价重点实验室, 北京 100081

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Key Laboratory of Active Tectonics and Crustal Stability Assessment, Beijing 100081, China*

**SUN D S, CHEN Q C, ZHANG Y Q, 2020. Analysis on the application prospect of ASR in-situ stress measurement method in underground mine [J]. Journal of Geomechanics, 26 (1): 33–38 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.01.003**

**Abstract:** Present in-situ stress state is an important data for the underground construction, tunnel stability analysis and rock burst (coal and gas burst) prediction in underground mine. At present, in-situ stress measurement in underground mine is mainly based on hollow inclusion gauge method. In practice, it is found that the stress meter of hollow inclusion gauge often fails to fully adhere to the borehole wall, which brings the low success rate and high labor intensity. In this paper, the anelastic strain recovery (ASR in short) in-situ stress measurement method based on the oriented cores is introduced. The effectiveness of ASR method are analyzed by comparing the test results with that obtained through the hydraulic fracturing method. The reliability of the ASR method is also analyzed by the repeatable test results. The results show that the maximum value of mean deviation parameter is 6.29%. The ASR method will have broad application prospects on in-situ stress measurement in underground mine with the advantages of safety, high efficiency and immunity to the limitation of depth and measurement environment.

**Key words:** underground mine; in-situ stress measurement; the hollow inclusion gauge method; the ASR method; application prospects

**摘 要:** 现今地应力状态是井下矿山建设、巷道稳定性分析和冲击地压(煤与瓦斯突出)预测等方面的重要基础数据。目前井下矿山地应力测试主要以空芯包体解除法为主, 实践中发现空芯包体解除应力计安装过程中, 易出现不能与孔壁完全黏贴的情况, 导致测试成功率较低且劳动强度较大。文章介绍了一种基于定向岩芯卸荷后非(滞)弹性恢复变形测量的近原位地应力测试方法(简称 ASR 法), 并通过与水压致裂地应力测试结果对比, 验证了 ASR 地应力测试方法的有效性。ASR 法的可重复性结果表明, 同一测点 ASR 地应力测量结果平均差系数最大为 6.29%, 验证了 ASR 地应力测量方法的可靠性。预期 ASR 法以其安全、高效且不受测量深度和测试环境限制等优点, 在井下矿山地应力测试中具有广阔的应用前景。

**关键词:** 井下矿山; 地应力测量; 空芯包体法; ASR 法; 应用前景

**中图分类号:** P553 **文献标识码:** A

**基金项目:** 国家科技重大专项项目 (2016ZX05034)

**第一作者简介:** 孙东生 (1980-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地应力测试理论与方法研究。E-mail: dongshengsun@189.cn

**收稿日期:** 2019-09-11; **修回日期:** 2019-12-25; **责任编辑:** 吴芳

**引用格式:** 孙东生, 陈群策, 张延庆, 2020. 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, 26 (1): 33–38

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.01.003

## 0 引言

现今地应力状态是井下矿山建设、巷道稳定性分析和冲击地压（煤与瓦斯突出）预测等方面的重要基础数据（鲜学福等，2001；王连捷等，2009；孙东生等，2010）。目前井下矿山地应力信息的获取主要以空芯包体解除法为主，代表性的测量传感器包括中国地质科学院地质力学研究所研发的 KX-81 型和澳大利亚生产的 CSIRO 型空芯包体应力计（王连捷等，1988，1991；蔡美峰等，1999；杨小聪和王连捷，2000；赵卫华等，2008）。受测量工艺及施工环境的影响，空芯包体解除法在实践中发现存在诸多问题，如安装过程受重力和钻孔条件影响，应力计很难完全与孔壁岩石黏贴，导致部分电阻应变片无法获取有效的岩体变形信息；套芯解除过程中要求获取不少于 40 cm 长度的完整岩芯，对于完整性较差的地层，测试成功率不高；应力计与孔壁黏贴后，需等胶完全凝固才能套芯解除，测量一个点需多次下井，测试周期较长且劳动强度较大。而寻求安全、高效且可靠的地应力测试方法是当前井下矿山建设工程中急需解决的问题之一。

非弹性应变恢复法（Anelastic Strain Recovery method，简称 ASR 法）是近年发展起来的基于定向岩芯的三维地应力测量方法，与其他岩芯法地应力测量相比，ASR 法具有相对完备的理论基础，且 ASR 法是在钻井现场进行测量，保持了岩芯的近原位状态（Voight，1968；Matsuki and Takeuchi，1993；Lin et al.，2006；Matsuki，2008；林为人，2008；王连捷等，2012；Sun et al.，2014）。文章介绍了 ASR 地应力测试方法的基本原理，通过与水压致裂地应力测量结果对比，验证了 ASR 地应力测试方法的有效性；通过测试结果的可重复性分析，验证了 ASR 法的可靠性。在此基础上，分析了 ASR 法在井下矿山地应力测试中的优势与不足，提出 ASR 法在井下矿山地应力测试中具有广阔的应用前景。

## 1 ASR 地应力测试方法简介

在岩石为均质、各向同性及线粘弹性材料假设的前提下，由 ASR 法所测不少于 6 个独立方向

的非弹性恢复应变，计算得到的主应变方向即为主应力方向，主应力大小与非弹性恢复应变之间的关系如公式（1）：

$$\varepsilon_a(t) = \frac{1}{3}[(3l^2 - 1)\sigma_x + (3m^2 - 1)\sigma_y + (3n^2 - 1)\sigma_z + 6lm\tau_{xy} + 6mn\tau_{yz} + 6nl\tau_{zx}] \times Jas(t) + (\sigma_m - p_0)Jav(t) + \alpha_T \Delta T(t) \quad (1)$$

其中  $l$ 、 $m$ 、 $n$  为应变轴的方向余弦， $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yz}$ 、 $\tau_{zx}$  为应力分量， $\sigma_m$  为平均应力， $p_0$  为孔隙压力， $\alpha_T$  为线性热膨胀系数， $\Delta T(t)$  为测量期间温度变化， $Jas(t)$  和  $Jav(t)$  分别为剪切和体积变形模式的非弹性应变恢复柔量。对于三维主应力的大小，还可通过公式（2）表示：

$$\sigma_i = e_i(t)/Jas(t) + \{e_m(t) - \sigma_T \Delta T(t)\} / Jav(t) + p_0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

其中  $e_i(t)$  为非弹性偏应变， $e_m(t)$  为平均正应变。从公式（1）可以看出，非弹性应变与原地应力分量、测量期间的温度变化、热膨胀系数、孔隙压力和非弹性应变恢复柔量有关。因此，在测量期间如果孔隙压力、温度不发生变化的情况下，应力分量可通过测量不少于六个独立方向非弹性应变及岩石的非弹性应变恢复柔量确定。

ASR 法测试流程简述如下：钻孔中采取定向岩芯（长度不少于 10 cm），经清洗后，沿基线（ $x$  轴）以及与基线相隔  $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $-45^\circ$ （顺时针方向为负）线粘贴应变片，即 C1，C2…，C18，如图 1 所示。应变片长轴方向称为应变片的轴向。共有 9 个轴向，即由轴 1 到轴 9。黏贴好应变片后对样品进行密封，放入恒温水浴槽，将应变片连接于数据记录仪，开始测量岩芯的非弹性恢复变形，一般每个样品测量 5~7 天，可同时测量 3~5 个样品。测试结束后，利用专用软件对数据进行处理，即可确定测点处三维地应力大小和方向信息（Sun et al.，2017）。

## 2 ASR 法可靠性分析

### 2.1 ASR 与水压致裂法地应力测试结果对比分析

水压致裂法是国内外认可的获取水平最小主应力大小的最可靠方法，具有操作简便和测量结果可重复的特点，近年在油气田（干热岩）开发、深埋隧道稳定性分析和地球动力学基础研究等领域得到了广泛应用和发展。为验证 ASR 地应力测试方法的有效性，对同一口井相邻深度 ASR 法和

水压致裂法地应力测量结果进行了对比分析。测量钻孔位于湖南省怀化市麻阳苗族自治县境内, 钻孔深度 2043.91 m, 终孔孔径 98 mm, 该井同时开展了 ASR 法和水压致裂法地应力测量, 该井 1260 m 深度处留茶坡组硅质岩卸荷后的非弹性恢复应变曲线如图 2a, 图中轴 1~轴 9 为不同方向的非弹性恢复应变曲线, 红色曲线为测量期间样品的温度变化。该井 1267 m 深度处水压致裂测量获取的井下压力-时间曲线如图 2b, 曲线上可以看出明显的破裂压力, 且多个回次的重张和关闭曲线重复性很好, 可获取可靠的关闭压力, 即最小水平主应力 (陈群策等, 2019)。

计算得到该钻孔 1260~1267 m 深度处 ASR 法和水压致裂法地应力测试结果, 如表 1 所示, 结果表明 ASR 法测量得到的水平最小主应力比水压致裂法得到的水平最小主应力低 3.43 MPa, 可能的原因是该井 1260 m 处温度约 56 °C (陈群策等,

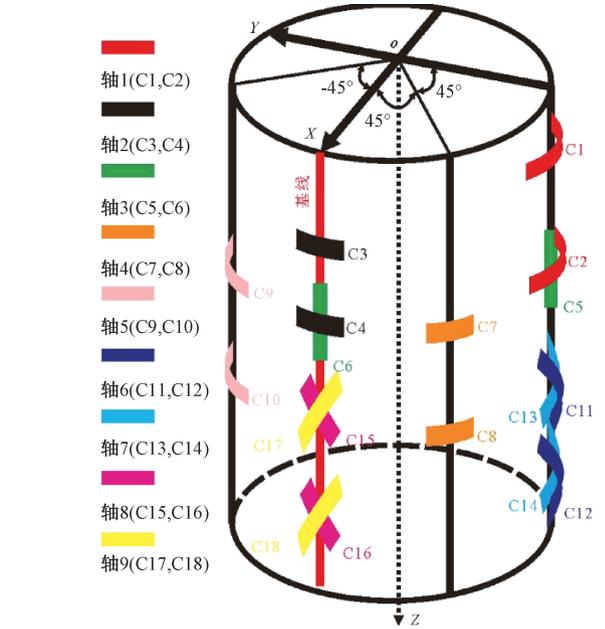
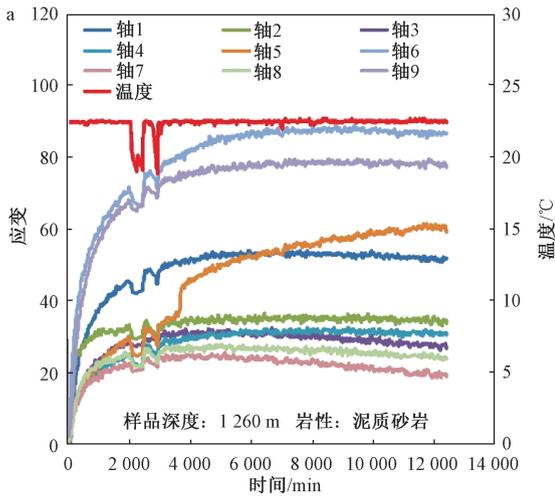
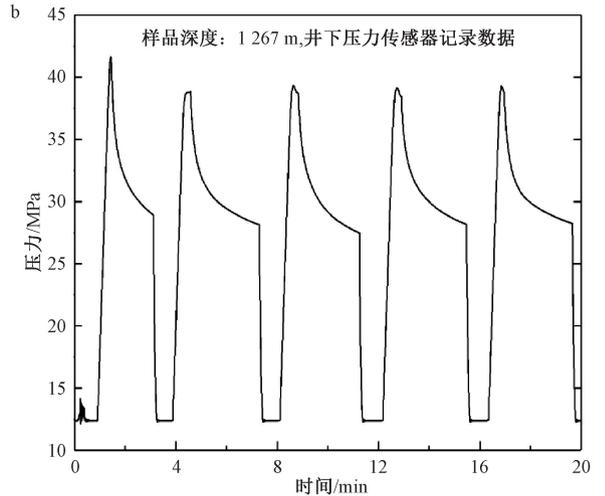


图 1 岩芯表面应变计的布置  
Fig. 1 The layout of strain gauges on the surface of a rock core



a—1260 m 样品 ASR 法测试曲线; b—1267 m 水压致裂法井下压力计记录曲线

图 2 雪峰山先导孔 ASR 法和水压致裂法测试曲线  
Fig. 2 Test curves of the ASR and hydraulic fracturing methods at Xuefengshan pilot hole

2019), 水压致裂法为原位地应力测量结果中包含由于温度引起的热应力。ASR 法是在地面实验室进行, 测试期间样品温度约 22 °C, 温度引起的热应力已释放, 故 ASR 法测量结果低于水压致裂法测量结果, 总体上, 两种方法得到的最小水平主应力误差约 10%, 一定程度上验证了 ASR 地应力测试方法的有效性。

### 2.2 ASR 法重复性分析

为进一步验证 ASR 地应力测试方法的可靠性, 开展了相邻样品 ASR 地应力测试结果的重复性分

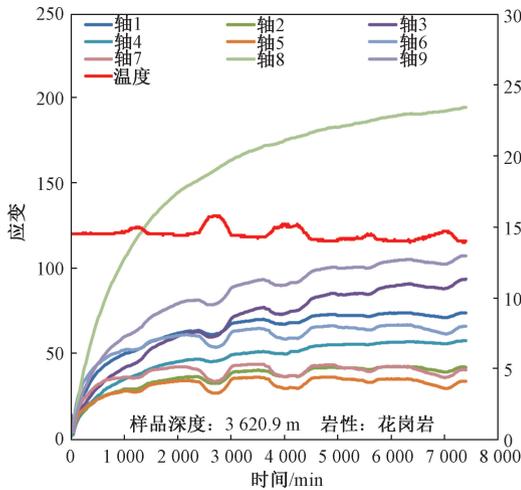
表 1 ASR 法与水压致裂法地应力测量结果对比  
Table 1 Comparison of in-situ measurement results from the ASR method and the hydraulic fracturing method

岩芯编号	深度/m	$\sigma_H$ /MPa	$\sigma_h$ /MPa	$\sigma_v$ /MPa
ASR 法	1260.00	42.03	29.09	33.40
水压致裂法	1267.00	50.79	32.52	33.58
均值	1263.50	46.41	30.81	33.49

注:  $\sigma_H$ —最大水平主应力;  $\sigma_h$ —最小水平主应力;  $\sigma_v$ —垂向应力;  $\sigma_v$  根据上覆岩层重量计算 (岩石密度取 2.65 g/cm<sup>3</sup>)。

析, 样品取自冀东地区干热岩钻孔, 两个相邻样品的长度约 20 cm, 样品的深度分别为 3620.9 m

和 3621.1 m, 岩性均为花岗岩, ASR 测试得到两个样品的非弹性应变恢复曲线如图 3 所示。图中轴 1—轴 9 为不同方向的非弹性恢复应变曲线, 红色曲线为测量期间样品的温度变化, 从图上可



以看出两个样品的非弹性恢复应变变量接近, 由于应变片黏贴位置发生了变化, 且两个样品开始测量的时间不同, 故非弹性恢复应变值存在一定差异。

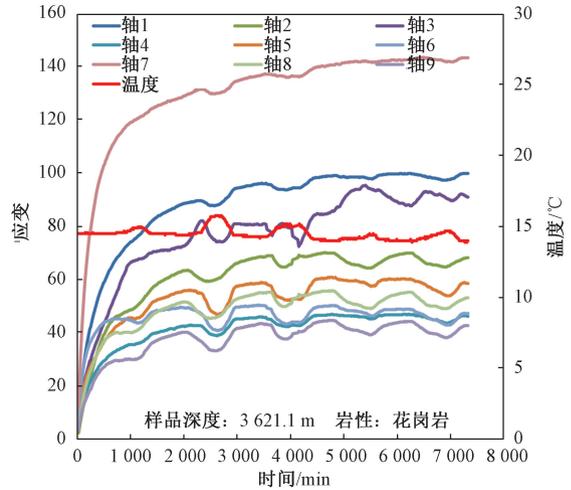


图 3 3620.9 m 和 3621.1 m 深度样品的非弹性应变恢复曲线

Fig. 3 The anelastic strain recovery curves of samples from 3620.9 m and 3621.1 m

应用 ASR 地应力专用计算软件 (孙东生, 2018), 利用样品的非弹性恢复应变信息计算得到上述两个相邻样品的原位地应力信息, 如表 2 所示, 相邻两个样品的 ASR 法地应力测量重复性

较好, 平均差系数最大为 6.29%, 表明两次测量得到的主应力值差别不大, 两种方法得到的平均值也证明了这一点, 验证了 ASR 地应力测试方法的可重复性。

表 2 ASR 法地应力重复测量结果

Table 2 Repeated measurement results through the ASR method

岩芯编号	深度/m	$\sigma_1$ /MPa	$\sigma_2$ /MPa	$\sigma_3$ /MPa	$\sigma_H$ /MPa	$\sigma_h$ /MPa	$\sigma_v$ /MPa
ASR1	3620.9	120.6	79.3	69.2	112.3	79.1	97.7
ASR2	3621.1	126.4	89.0	78.5	117.2	78.9	97.8
均值	2621.0	123.5	84.2	73.9	114.8	79	97.8
平均差系数	—	2.35%	5.76%	6.29%	2.13%	0.13%	0.05%

注:  $\sigma_1$ -最大主应力;  $\sigma_2$ -最大主应力;  $\sigma_3$ -中间主应力;  $\sigma_H$ -最大水平主应力;  $\sigma_h$ -最小水平主应力;  $\sigma_v$ -垂向应力;  $\sigma_v$  根据上覆岩层重量计算 (岩石密度取 2.70 g/cm<sup>3</sup>)。平均差系数采用常用的统计学公式计算

### 3 ASR 法在井下矿山地应力测试中的应用前景

ASR 法与空芯包体解除法类似, 都是具有相对完备理论基础的三维地应力测试方法, 都是通过测量岩石的变形获取地应力信息, 不同的是空芯包体解除法测量的是岩石卸荷时的弹性变形, ASR 法测量的是岩石卸荷后的非 (滞) 弹性变形, 总体上空芯包体解除法测得的应变变量大于 ASR 法。与空芯包体解除法相比, ASR 法用于井下矿山地应力测试的优势主要包括以下几个方面。① ASR

法是在岩芯表面黏贴精密应变片, 应变片与岩石黏贴质量好且可避开明显的节理裂隙段, 测量期间保持岩芯温度恒定, 消除了温度对结果的影响; ② ASR 法一次可实现多个岩芯样品同时测试, 通过多点数据平均或对比分析, 提高测试结果可靠性; ③ ASR 法不受测量钻孔深度和测试环境限制, 只要在井下能够取得定向岩芯, 即可开展测试; ④ ASR 法是取得井下定向岩芯, 在地面实验室测量, 减少了下井作业次数, 保障了测试人员的安全。除上述优势外, ASR 法在应用中也存在一定局限性, 对于黏土矿物含量高的岩石 (如泥页岩), 测量期间 (一般 5~7 天) 矿物失水会产生

收缩变形, 与应力释放引起的膨胀变形相反, 因此测量时应尽量选取泥质含量低的样品。预期 ASR 法以其安全、高效且不受测量深度和测试环境限制等优点, 在井下矿山地应力测试中具有广阔的应用前景。

## 4 结论

文章简述了井下矿山地应力测试研究现状, 介绍了 ASR 地应力测试方法的基本原理, 并结合实测数据表明了 ASR 地应力测试方法的有效性和可靠性, 分析了 ASR 法在井下矿山地应力测试中的应用前景, 结论如下:

(1) ASR 法是具有相对完备理论基础的三维地应力测试方法, 测量期间可保证应变片的黏贴质量和温度稳定, 保持了岩芯近原位状态, 可获取相对可靠地应力信息。

(2) 通过与水压致裂法地应力测量结果对比, 验证了 ASR 地应力测试方法的有效性, ASR 法的可重复性结果表明, 同一测点 ASR 地应力测量结果平均差系数最大为 6.29%, 验证了 ASR 地应力测量方法的可靠性。

(3) ASR 法以其安全、高效且不受测量深度和测试环境限制等优点, 在井下矿山地应力测试中具有广阔的应用前景。

## References

CAI M F, QIAO L, YU B, et al., 1999. Results and analysis of in-situ stress measurement at deep position of No. 2 mining area of Jinchuan Nickel mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 18 (4): 414-418. (in Chinese with English abstract)

CHEN Q C, SUN D S, CUI J J, et al., 2019. Hydraulic fracturing stress measurements in Xuefengshan deep borehole and its significance [J]. Journal of Geomechanics, 25 (5): 853-865. (in Chinese with English abstract)

LIN W R, 2008. A core-based method to determine three-dimensional in-situ stress in deep drilling wells: anelastic strain recovery technique [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27 (12): 2387-2394. (in English with Chinese abstract)

LIN W R, KWASNIEWSKI M, IMAMURA T, et al., 2006. Determination of three-dimensional in situ stresses from anelastic strain recovery measurement of cores at great depth [J]. Tectonophysics, 426 (1-2): 221-238.

MATSUKI K, 2008. Anelastic strain recovery compliance of rocks and its application to in situ stress measurement [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45 (6): 952-965.

MATSUKI K, TAKEUCHI K, 1993. Three-dimensional in situ stress determination by anelastic strain recovery of a rock core [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 30 (7): 1019-1022.

SUN D S, 2018. Calculation software of ASR in-situ stress measurement method [PELVRES] 1. 0: No. 2976423 [CP]. 2018-05-02. (in Chinese)

SUN D S, LIN W R, CUI J W, et al., 2014. Three-dimensional in situ stress determination by anelastic strain recovery and its application at the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Hole-1 (WFSD-1) [J]. Science China Earth Sciences, 57 (6): 1212-1220.

SUN D S, SONE H, LIN W R, et al., 2017. Stress state measured at ~7 km depth in the Tarim Basin, NW China [J]. Scientific Reports, 7: 4503.

SUN D S, WANG L J, ZHAO W H, et al., 2010. The application of in-situ stress measurement to the study of coal and gas outburst in coal mines [J]. Geology in China, 37 (1): 223-228. (in Chinese with English abstract)

VOIGHT B, 1968. Determination of the virgin state of stress in the vicinity of a borehole from measurements of a partial inelastic strain tensor in drill cores [J]. Felsmechanik und Ingenieurgeologie, 6: 201-215

WANG L J, LIAO C T, OU M Y, et al., 1988. KX-81 triaxial hollow inclusion gauges for in-situ stress [M] //Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geosciences. Bulletin of the Institute of Geomechanics CAGS. Beijing: Geological Publishing House: 127-136. (in Chinese)

WANG L J, PAN L Z, LIAO C T, 1991. Crustal stress measurements and their application in engineering [M]. Beijing: Geological Publishing House: 110-145. (in Chinese)

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)

WANG L J, SUN D S, ZHANG L R, et al., 2009. Application of in-situ stress measurement on bursts disasters of rock and CO<sub>2</sub> in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 34 (1): 28-32. (in Chinese with English abstract)

XIAN X F, XU J, WANG H T, 2001. Predication of potential danger region (zone) of coal and gas outburst [J]. Engineering Science, 3 (2): 39-46, 51. (in Chinese with English abstract)

YANG X C, WANG L J, 2000. Error processing and precision estimation for rock stress measurement [J]. Journal of Geomechanics, 6 (2): 53-63. (in Chinese with English abstract)

ZHAO W H, SUN D S, WANG H C, et al., 2008. Measurement of rock stress of Hongling coal mine [J]. Journal of Geomechanics, 14 (3): 286-291. (in Chinese with English abstract)

## 附中文参考文献

蔡美峰, 乔兰, 于波, 等, 1999. 金川二矿区深部地应力测量及其分布规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 18 (4): 414-418.

陈群策, 孙东生, 崔建军, 等, 2019. 雪峰山深孔水压致裂地应力测量及其意义 [J]. 地质力学学报, 25 (5): 853-865.

- 林为人, 2008. 基于岩芯非弹性应变恢复量测定的深孔三维地应力测试方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 27 (12): 2387-2394.
- 孙东生, 王连捷, 赵卫华, 等, 2010. 地应力测量在煤与瓦斯突出灾害研究中的应用 [J]. 中国地质, 37 (1): 223-228.
- 孙东生, 2018. ASR 法地应力计算软件 [PELVRES] 1.0: 软著登字第 2976423 号 [CP]. 2018-05-02.
- 王连捷, 廖椿庭, 区明益, 等, 1988. KX-81 型空芯包体三轴地应力计 [M] //中国地质科学院地质力学研究所. 地质力学文集第八集. 北京: 地质出版社: 127-136.
- 王连捷, 潘立宙, 廖椿庭, 1991. 地应力测量及其在工程中的应用 [M]. 北京: 地质出版社: 110-145.
- 王连捷, 孙东生, 张利容, 等, 2009. 地应力测量在岩石与 CO<sub>2</sub> 突出灾害研究中的应用 [J]. 煤炭学报, 34 (1): 28-32.
- 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.
- 鲜学福, 许江, 王宏图, 2001. 煤与瓦斯突出潜在危险区 (带) 预测 [J]. 中国工程科学, 3 (2): 39-46, 51.
- 杨小聪, 王连捷, 2000. 地应力测量的误差处理及精度评定 [J]. 地质力学学报, 6 (2): 53-63.
- 赵卫华, 孙东生, 王红才, 等, 2008. 沈阳红菱煤矿地应力测量 [J]. 地质力学学报, 14 (3): 286-291.

### 开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

