

中国大陆科学钻探主孔 声发射法现今地应力状态的确定

王连捷¹ 李朋武² 崔军文² 丁原辰¹

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要:对中国大陆科学钻探主孔的岩心进行了声发射测量, 确定了 301~1 531 m 深度的最大主应力。并与钻孔崩落法(深度 1 269~1 655 m)测量结果进行了对比, 结果表明, 声发射测量所得测值基本上落在钻孔崩落法测值的趋势线上, 两种方法所得结果一致, 说明测量结果可信。测量结果表明科学钻探主孔地应力大小随深度增加, 在浅部 301m 最大主应力为 13.4 MPa, 在深部 1 655 m 为 55.2 MPa。随深度的增加率为 0.0279 MPa/m。最大主应力方向为 N 54°±3.3°E, 且方向不随深度变化。

关键词:中国大陆科学钻探; 声发射应力测量; 地应力状态; 钻孔崩落法应力测量
中图分类号: P223 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2005)02-0259-06

中国大陆科学钻探的主孔位于江苏省东海县, 构造位置上处于郯庐断裂带附近, 苏鲁—大别高压超高压变质带内(图 1)。了解钻孔地区区域地应力状态是该区地壳构造动力学研究重要内容和基础工作。

笔者就是利用中国大陆科学钻探主孔的岩心确定最大水平应力大小, 并与钻孔崩落法测量结果进行对比, 从而评价主孔现今所处的构造应力环境, 为该区地壳构造动力学研究提供依据。

1 方法原理

1.1 通用方法简述

岩石同金属材料一样也存在声发射的凯瑟效应(Kaiser effect)^[1], 上世纪 70 年代以来已形成运用凯瑟效应测量地应力的通用 AE 方法^[2]。即从现场取回定向大岩心, 室内在大岩心上, 按 6 个以上方向取定向试样, 每方向至少取 10 个, 而后在压力机上对试样加载, 测量其声发射。由声发射累积数与外加压应力关系曲线(以下简称响应曲线)上第一个明显的斜率陡增

点, 判断为凯瑟效应出现点。该点对应的外加压应力值视为取样方向上的先存正应力值。统计出各取样方向的正应力值用于计算测点 3 个主应力大小和方向。该方法的两个前提是: 认为凯瑟效应有方向性, 即不同方向所取试样的凯瑟效应反映该方向上的先存正应力; 并认为所测的是历史最高地应力状态。

很多学者证实凯瑟效应不存在明显的方向性, 往往响应曲线上第一个斜率陡增点与取样方向正应力无明显对应关系, 第二个斜率陡增点却与测点的最大主应力 σ_1 相对应^[3]。Michihiro K^[4]指出: 凯瑟效应并不对应岩石的历史最高应力, 而是对应于引起饱和残余应变的应力, 正因为如此, 用岩石试样的凯瑟效应可测量地应力。由此可见, 对于凯瑟效应是否有方向性存在争议。故笔者不考虑方向性, 只考虑应力大小。

1.2 测量地应力状态的声发射估测法

丁原辰等^[5]发现了岩石声发射存在这样一种现象: 如果岩石试样第一次加载(简称初压)经某一压应

收稿日期: 2005-02-16; 改回日期: 2005-02-28

基金项目: 科技部重大基础研究前期研究专项(2001CCB00900)、国土资源部科技专项(2002207)、国土资源部重点科技项目(20010101)和中国地质调查局地质大调查项目(150C002004)资助。

作者简介: 王连捷, 男, 1933 年生, 研究员, 从事地应力测量—构造应力场数值分析及其在地质和工程中的应用研究; E-mail: wangljoi@sina.com。

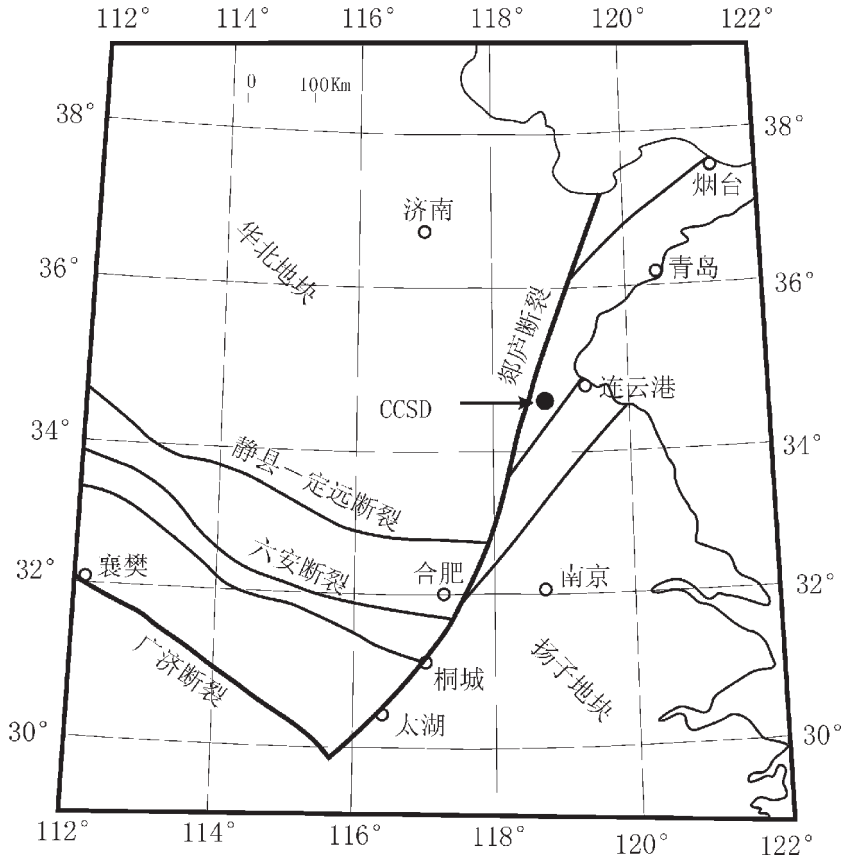


图1 中国大陆科学钻(CCS D)的主孔位置

Fig.1 Location of the main hole of Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD)

力值时显示凯瑟效应,紧接着在一定技术条件下作第二次加载(以下简称复压)时,在声发射率(指每秒声发射计数)记录曲线上相应于初压显示凯瑟效应处,也有与之相对应的显著而又相对孤立的声发射信号出现。他们将这一现象称为“抹录不净现象”。并证实声发射抹录不净现象也不存在明显的方向性。

丁原辰等^[6]运用抹录不净现象建立了只测地应力最大主应力值的声发射估测法:从现场取回大岩心或待测地点的新鲜石块,在不同方向(3~4个任意方向)上取试样,测得各试样初压、复压 AE(声发射)率记录值,并分别绘出它们的 AE 累积数与外加压应力响应曲线,以初压、复压响应曲线上第二个斜率陡增点和抹录不净点作为三维最大主应力值。如果从 3~4 个方向上所取的岩石试样测得的最大主应力值相近,偏差值大体在 15%以内,那么可认为此最大主应力测值可靠。这种不能确定方向只能给出地

应力最大主应力值的方法,被简称为地应力状态的声发射估测法。该方法已应用于油田及岩体工程的地应力测量^[5,7]。笔者同样应用该方法进行测量。

2 测量装置及对岩样的要求

2.1 测量装置

测量装置由传感器、鉴别单元、定区检测单元、计数单元及计算机组成(图 2)^[6]。传感器将声音转换为电信号,鉴别单元将信号滤波放大,将门拦电压一伏,前沿时间 100 微秒及间隔一毫秒的信号送至定区检测单元,检测出特定区域内的信号,并送至计数单元,计算累积数及发射率,经计算机处理后输出结果,画出曲线。

2.2 对岩样的要求

对声发射法所用岩样的要求如下^[6]:

- (1) 岩样新鲜;无裂纹、裂隙;结构均匀;具有一

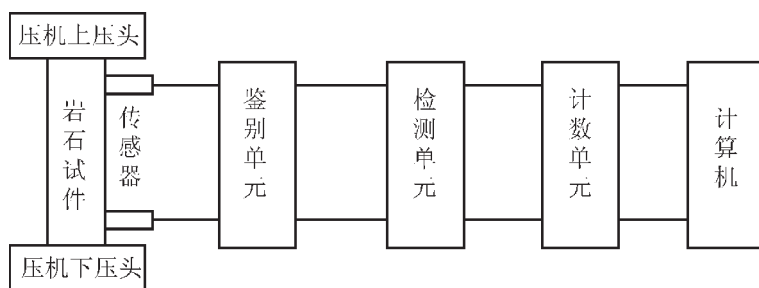


图 2 声发射测量装置略图

Fig. 2 Sketch of acoustic emission (AE) measurement

定强度;

(2)岩样直径 25 mm,高 50~75 mm;

(3) 岩柱两端面需磨平,其不平行度误差小于 0.01 mm;

(4)岩柱两端面与轴的不垂直度误差小于 0.1 度;

(5)试样柱侧面应当是光滑的,以防表面应力集中,表面光洁度不低于 5 级(3.2 μm);

(6)岩柱整个高度上的直径差不得超过 0.2 mm;为消除端部应力集中,试样两端浇铸由水泥和环氧树脂混合材料制成的端帽,两端帽不平行度误差也应小于 0.01 mm。

3 声发射法测量结果

沿钻孔 5 个深度即 301 m、598 m、1003 m、1 258 m、1 531 m 分别取样,按取样要求每个点制成 10 个岩样。在测量装置上进行声发射测量(表 1、图 3)。

表 1 声发射法测量结果

Table 1 Result of acoustic emission measurement

测点深度/m	岩性	岩样数量/个	最大主应力/MPa
301	榴辉岩	10	13.4
598	灰褐色榴辉岩	10	22.7
1003	榴辉岩	10	36.9
1258	灰黑色片麻岩	10	38.4
1531	正片麻岩	10	48.5

由表 1 及图 3 可以看出,最大水平主应力在浅处 301 m,深度为 13.4 MPa,在 1 531 m 深度为 48.5 MPa。地应力随深度变化的拟和曲线为直线,其表达式为:

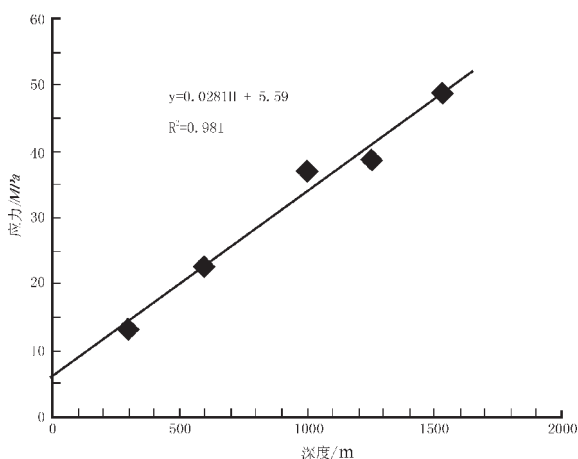


图 3 声发射法测定的不同深度最大主应力

Fig. 3 Maximum principal stresses at different depth determined by acoustic emission measurement

$$S1=5.59+0.0281H \quad (1)$$

式中 $S1$ 为最大水平主应力,单位为 MPa ; H 为深度,单位为 m。

拟和曲线的相关系数为 0.988,说明测量结果离散性很小,精密度较高。

地应力随深度线性增加,增加梯度为 0.028 MPa/m。

地应力的大小及其随深度的变化规律与中国大陆地应力的平均值及变化规律相近^[9]。中国大陆地应力最大水平主应力回归平均值表达式如下:

$$S1=7.36 + 0.0225H \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可以看出,科学钻主孔地应力梯度略高于中国大陆地应力最大水平主应力回归平均值。这是合理的,因为全国地应力的平均值主要是

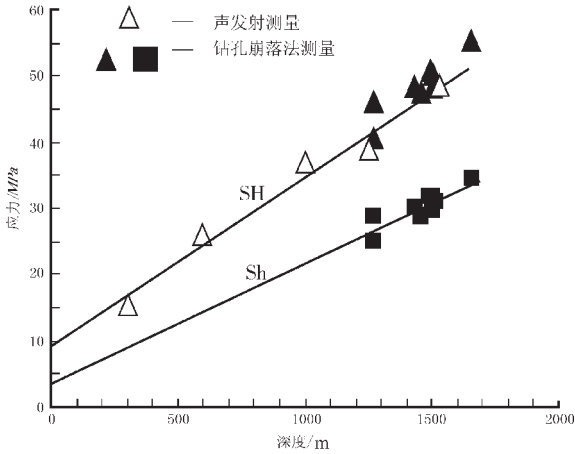


图 4 声发射法与钻孔崩落法地应力测量结果及其随深度的变化

SH—最大水平主应力; Sh—最小水平主应力

Fig.4 Stress variations with depth in the main borehole of CCSD

SH—Maximum horizontal principal stress;
Sh—Minimum horizontal principal stress

以油田地应力为基础得到的, 而油田地应力一般是偏低的。

4 声发射法与钻孔崩落法结果的比较

中国大陆科学钻探主钻孔在 1 200 m 深度以下出现了钻孔崩落现象, 在 1 200 m 至 2 015 m 的范围内采集了钻孔成像测井图像资料。利用崩落

表 2 钻孔崩落法地应力测量结果
Table 2 Result of stress measurements by borehole breakout

H	S1	S2
1269	46	28.75
1269	40.4	25.25
1430	48.4	30.3
1454.8	47.6	28.8
1491.8	50.8	31.75
1493.8	48	30
1495.8	50.8	31.75
1498.3	49.2	30.25
1500	48	30
1502	50	31.25
1655	55.2	34.5

注: H 为深度, S1 和 S2 为最大和最小水平主应力。

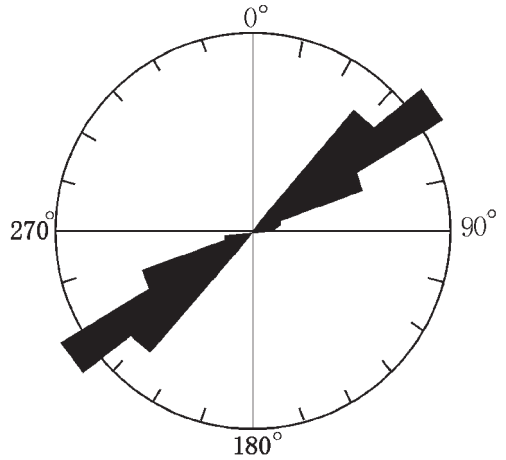


图 5 根据钻孔崩落法确定的 1 269~2 000 m 深度的最大水平主应力方位(由 82 个数据统计)

Fig. 5 Azimuth of the maximum horizontal principal stress at 1269~2000 m depth determined by borehole breakouts measurement of CCSD (calculated on the basis of 82 data)

形状要素(崩落深度和崩落宽度)以及岩石力学实验确定的岩石内聚力和摩擦系数, 计算了 1 269 m、1 655 m 深度上的最大和最小水平主应力的大小(表 2)。

为了进行对比, 笔者将声发射法测量结果与钻孔崩落法测量结果画在同一张图上(图 4)。

由图 4 可以看出, 声发射法所得测值基本上落在钻孔崩落法测值的趋势线上, 两种方法所得结果基本一致。

根据 82 个钻孔成像测井图像资料, 对钻孔崩落长轴方位进行了方向统计, 结果表明最大水平主应力方位的平均值为 $54.8 \pm 3.3^\circ$ (图 5)^[10]。

钻孔崩落现象只出现在深处, 因而钻孔崩落法只能确定深部应力状态。而声发射法可以补充浅部地应力资料。声发射法与钻孔崩落法相结合, 使测量数据更加充分和完整。

5 结 论

(1) 声发射法与钻孔崩落法测量结果的对比表明, 两种方法所得结果十分一致。测量结果是可靠的, 可作为构造动力学研究的基础资料。(2) 地应力大小随深度增加, 在浅部 301 m 最大主应力为 13.4 MPa,

在深部 1 655 m 为 55.2 MPa。随深度的增加率为 0.0279 MPa/m。主应力方向为 $N 54.2 \pm 3.3^\circ E$, 方向不随深度变化。(3) 通常钻孔崩落法只能测量深部应力状态, 而声发射法既能测量浅部, 也能测量深部, 但不能给出方向。因此, 两种方法相结合, 可以互相补充, 相互验证, 提高测量结果的完整性和可靠性。

参考文献(References):

- [1] Goodman R E. Subaudible noise during compression of rock [J]. Geological Society of America Bulletin, 1963, 74: 4872~4900.
- [2] Kanagewa T, Hayashi M, Nakas H. Estimation of spatial geo-stress components in rock samples using the Kaiser Effect of acoustic emission[A]. In: Proceedings of Third Acoustic Emission Symposium[C]. 1976, 229~248.
- [3] Hardy H R Jr, Zhang D, Zelanko J C. Recent studies of the Kaiser effect [J]. Geologic Materials. Clausthal: Trans.Tech.Publications, 1989, 27~55.
- [4] Michihiro K, Fujiwara T, Yoshika H. Study on estimating geo-stress by the Kaiser effect of AE [A]. In: Proc. 26th US Symposium on Rock Mechanics[C]. Rapid City, 1985, 557~564
- [5] 丁原辰, 张大伦. 声发射抹录不净现象在地应力测量中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(4): 313~326.
Ding Yuanchen, Zhang Dalun. Application of the incomplete erasion phenomenon in acoustic emission activities to the measurement of geostresses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 1991, 10 (4): 313~326 (in Chinese with English abstract).
- [6] 丁原辰. 矿区地应力状态声发射粗估法及其应用[J]. 煤炭工程. 1992, (4): 50~56.
Ding Yuanchen. Rock stress measurement by the AE method and its application in mine [J]. Coal Engineer, 1992, (4): 50~56 (in Chinese with English abstract)
- [7] 丁原辰, 孙宝珊, 邵兆刚, 等. AE 法油田最大主应力值的测量及其与油产关系[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 315~321.
Ding Yuanchen, Sun Baoshan, Shao Zhaogang, et al. The major principal stress of oil field determined by AE and its relation to production [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17 (3): 315~321 (in Chinese with English abstract).
- [8] 丁原辰, 张大伦. 声发射法地应力测量的岩样制备[J]. 应用声学, 1997, (16): 26~29.
Ding Yuanchen Zhang Dalun. The preparation of rock specimens in geostress measurement by the AE method [J]. Applied Acoustics, 1996, 16 (6): 26~29 (in Chinese with English abstract).
- [9] 王连捷, 潘立宙, 廖椿庭, 等. 地应力测量及其在工程中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 1991, 148~150.
Wang Lianjie, Pan Lizhou, Liao Chunting, et al. Crustal stress measurements and their application in engineering [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991 (in Chinese with English contents).
- [10] 崔军文, 王连捷, 李朋武, 等. 中国大陆科学钻探主孔 2000 米以上脆性变形构造应力场[J]. 岩石学报, 2004, 31(4): 73~80.
Cui junwen, Wang Lanjie, Li Pengwu, et al. Tectonic stress field of brittle deformation within 2000 m of the main borehole of Chinese continental scientific drilling [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20 (1): 73~80 (in Chinese with English abstract).

Determination of the present crustal stress state by using acoustic emission in the main borehole of the Chinese Continental Scientific Drilling

WANG Lian-jie¹, LI Peng-wu², CUI Jun-wen², DING Yuan-chen¹

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*))

Abstract: The magnitude of the maximum principal stress is determined by using acoustic emission measurements of cores at 301, 598, 1003, 1258 and 1531 m depth in the main borehole of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project, and the measurement results of acoustic emission are compared with the measurement results of borehole breakouts. It is shown that the results from two methods are in good agreement. The results of stress measurement are reliable. The magnitude of stress in the main borehole increases with depth. The maximum principal stress is 13.4 MPa at 301 m depth and 55.2 MPa at 1655 m depth. The increase rate with depth is 0.0279 MPa/m. The direction of the maximum principal stress is $N 54.2^\circ \pm 3.3^\circ E$ and does not change with depth. It is considered that acoustic emission combined with borehole breakouts is an economic and effective method for deep in-situ stress measurement.

Key words: Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD); acoustic emission stress measurement; crustal stress state; borehole breakout method for rock stress measurement

About the first author: WANG Lian-jie, male, born in 1933, professor, engaged in the field of rock stress measurement and stress field modeling and its application in geology and engineering; E-mail: wangljoi@sina.com.