

超声波钻孔电视在地应力测量研究中的应用

毛吉震, 陈群策, 王成虎

(中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

摘要: 通过一个 300 m 和一个 800 m 典型钻孔的实际测试结果, 揭示超声波钻孔电视在地应力测量研究领域中的几个应用实例, 如: 岩层裂缝的检测、地应力测试段的选定、岩芯定向, 特别是对水压致裂法形成的诱发裂缝和孔壁崩落的测定及分析, 在地应力测量研究中将可显示出较强的优势, 尤其是最大水平主应力方向的获取, 更优于其它方法。并将在两个钻孔中所得结果与常用的定向印模测试结果进行了对比, 取得了较为一致的成果。关于超声波钻孔电视对水压致裂法诱发裂缝的测试还未曾见过报道。最后简述了地应力数值大小的推估研究与展望。

关键词: 超声波钻孔电视; 裂隙检测; 诱发裂缝; 孔壁崩落; 地应力测量

中图分类号: TU413 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2008)01-0046-05

作者简介: 毛吉震(1952-), 男, 副研究员, 主要从事原地应力测试及研究。E-mail: maojzh2988@sina.com。

Application of acoustic borehole televiewer to measurement of in-situ stress

MAO Ji-zhen, CHEN Qun-ce, WANG Cheng-hu

(Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China)

Abstract: Based on the measured results of two boreholes 300 m borehole and 800 m in depth, respectively several application cases of acoustic borehole televiewer to the measurement of in-situ stress were revealed: detection of fissures in the rock mass, determination of test interval for measurement of in-situ stress and orientation of borehole cores. Especially for the definition and analysis of induced fissures created by hydraulic fracturing and borehole wall breakouts, there were many advantages of this equipment and method in the in-situ stress measurement to determine the orientation of the principal horizontal stress. It was shown by the comparison of the final results with those of the typical fracture impression method that the two methods coincided with each other. In the end, a study on the estimation of magnitude of in-situ stress was described.

Key words: acoustic borehole televiewer; detecting of fissures; fissure induction; borehole wall breakout; measurement of in-situ stress

0 引言

超声波钻孔电视是利用超声波对钻孔孔壁进行扫描成像的一种物理测井设备^[1-2]。在地学领域中有着广泛应用, 如地层裂隙的检测及层隙分析等^[3-5]。下面以北京房山 300 m 钻孔^[6]和三峡 800 m 钻孔^[7]为例, 用实测结果叙述其在地应力测量中的应用。北京房山的 300 m 钻孔, 是中日合作项目中的一个深孔, 本次合作试验的目的主要是研究水压致裂过程中裂缝的传播机制、裂缝开裂时的几何形态以及水压致裂应力测量中的有关问题。三峡 800 m 钻孔是我国水电项目中的一个深孔, 其目的是了解三峡地区地应力场与地震的关系以及蓄水后库区诱发地震成因的研究。为实现其目的, 除要详细地了解该区域的地质结构和节理裂隙的发育状况外, 还要了解地应力的方向和大小。因此, 除通常的地质调查外, 对钻孔还需进行全面的了解。只有根据孔壁形态、裂隙状态及其分布进行选段, 才能有目的地进行

不同形式(如完整岩体和有裂隙岩体)的地应力测试试验。否则试验将不能顺利进行, 甚至达不到预期目的。在以上钻孔内进行常规勘测时, 观测到了水压致裂诱发裂缝和孔壁崩落, 通过进一步分析研究发现, 超声波钻孔电视不仅能用来检测岩层裂隙, 而且在应力测量中更能便捷的获取地应力的最大水平主应力方向及其它参数。

1 超声波钻孔电视基本工作原理简述

超声波钻孔电视是公认的最佳孔壁探测设备。该系统分井下和地面两大部分。井下部分是测试探头, 主要有超声波传感器、同步微电机、门控磁通定向仪和信号处理单元等。测井时超声波传感器如同井下雷

基金项目: 财政部基本科研业务专项资助项目(ZDJ2007-5)

收稿日期: 2007-01-25

达, 在同步微电机的带动下匀速顺时针转动, 并向孔壁发射扫描脉冲, 同时又把这些扫描脉冲的反射信号接收下来, 送给处理单元进行处理, 使其形成一个全电视测井信号, 经电缆(或光缆)送到地面进行处理、显示及计算机采集。每当传感器转动通过地磁北极时, 定向磁通线圈就切割一次大地磁场, 便产生一个定向指令脉冲去控制扫描脉冲从地磁北极开始顺时针北→东→南→西→北对孔壁进行扫描。根据反射波的能量, 将显示出一条明暗不等的扫描线, 它是孔壁以地磁北极为基点 360° 的平展扫描线。在绞车升降过程中即可将一条条扫描线形成图像, 该图像是以地磁北极剖开而平展的孔壁图像, 典型图像见图 1。

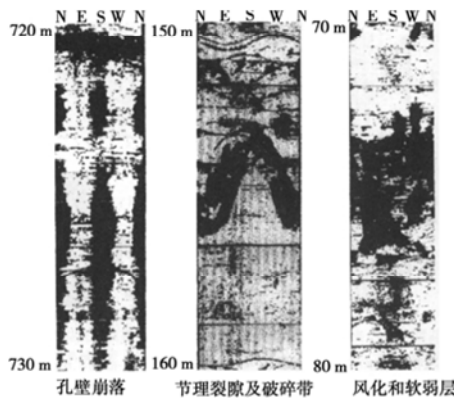


图 1 超声波钻孔电视常见测井图像

Fig. 1 Photo of acoustic borehole imaging

当探头扫描一个与孔轴垂直的节理或裂隙时, 由于层间或裂隙中的充填物质与其上下界面的介质不同, 反射波的能量也各不相同, 因此在显示器上便显示出一条水平线条; 当传感器扫描一条与孔轴平行的节理或裂隙时, 将会形成一条或多条竖直线; 当传感器扫描一条有一定倾角的节理或裂隙时, 扫描获得的图像将视为一条正弦或余弦曲线, 曲线的幅值越高, 节理裂隙的倾角就越大, 曲线波谷所对应的方位就是节理裂隙的倾向; 当孔壁有坍塌掉块或存有溶洞时, 图像将呈现不规则的黑洞, 通过计算即可得出坍塌掉块或溶洞的几何形状及方位和具体深度。

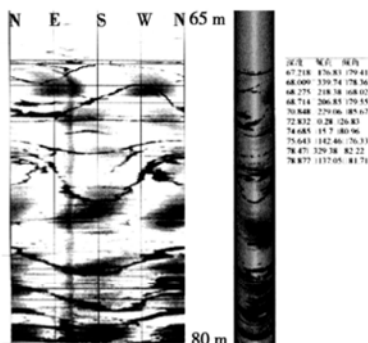


图 2 钻孔裂隙及产状柱状图

Fig. 2 Borehole fractures & occurrence column

探测钻孔孔壁常用的设备有斯伦臂斜测井仪、微电极扫描和超声波钻孔电视, 相比之下, 超声波钻孔电视的测井效果最好, 它能对钻孔进行 360° 全孔扫描, 可以全面的反映钻孔和节理裂隙的真实状况, 通过计算机软件处理后, 孔壁图像可转换为能任意旋转角度的柱状体, 如同岩芯柱状图, 见图 2。

2 超声波钻孔电视在地应力测量研究中的应用

地层产状及节理裂隙的检测, 通常是根椐钻探及其描述来了解地层产状及节理裂隙的发育。若地质条件不好、裂隙较为发育以及由钻探技术所造成的取芯率低或无岩芯钻进的钻孔, 就要借助物探仪器才能对其进行详细地了解。常规的物探测井仪很难得出裂隙的倾向、倾角和其宽度。

由于超声波钻孔电视对孔壁的裂隙具有较好的检测功能, 因而下面就用实例叙述其在地应力测量中所发挥的作用。

2.1 地层产状及节理裂隙的检测

在地应力测量中, 特别是水压致裂法和套芯解除法的地应力测量, 都需在岩体完整、无节理裂隙、孔径均匀、光滑的钻孔中进行。所以在地应力测量前有条件的情况下, 均应对钻孔进行检测, 否则由于节理裂隙的影响, 所测应力数值将要受到干扰, 即不能反映实际应力状态。对此, 为使中日合作的水压致裂应力测量及其裂隙传播机制的研究能顺利开展, 并能取得较为满意地资料, 在造孔结束后应力测试前, 用超声波钻孔电视对 300 m 的试验孔进行了全孔检测。在孔深 16.5~300 m 范围内, 共获得节理裂隙 25 组 64 条。每条裂隙的产状见图 3。

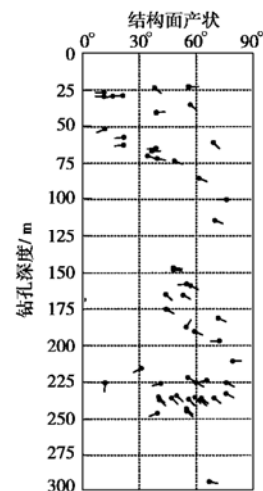


图 3 北京房山 300 m 钻孔裂隙产状随深度展布

Fig. 3 Attitudes of fissures vs. depth of a borehole 300 m in depth, in Fangshan, Beijing

2.2 试验段位置的选定

水压致裂法地应力测量及常规压水、高压压水渗透试验和特种情况下的水力阶撑试验等,在试验中由于目的不同,对试验段的长度及岩体的完整度和裂隙分布的要求也各不相同。如水压致裂法地应力测量的试验段,一般都要求岩石完整、无节理裂隙,试验段长度多为0.60~1.00 m。

而常规压水和高压压水渗透试验为较大尺度的试验,试段长度一般为5~10 m,有的根据地层及试验要求,试段长度可相应缩短或增长。

水力阶撑试验段,通常要求试段内含有节理裂隙,有的需要对一条裂隙进行试验,有的要对几条或一组,有的甚至要对某一个长度段进行试验。

以上是对几种试验段的要求。此外,还要考虑试验段两端止水设备的安全,即止水栓塞(封隔器)所处的位置,若只考虑试验段的要求而忽略了止水栓塞所处的环境,如止水栓塞正处于透水性较强的高角度裂隙上,或处于孔壁掉块及溶洞处,均能导致因止水效果不好所形成的试验结果失实或试验失败,甚至带来止水封隔器损坏所造成的试验重做、费时费力增大试验成本及其不良后果。

多年来,根据超声波钻孔电视提供资料所选择的测试位置,其测试结果均较满意。如在北京房山300 m钻孔中,根据钻孔的裂隙分布和试验目的的不同,共选择了64个地应力测量点,其中含原生裂隙的6个测段,扩大压裂6段,常规压裂52段,并还选定了57个压水试验段。通过实测验证测试结果均较理想,设备进出顺利安全,节省了大量的人力、物力和时间。

2.3 钻探岩芯方位的确定

在通常的岩石试验及声发射(AE)应力测量^[8]时,为确定岩芯的方位,将使用岩芯定向装置,在定向岩芯获取过程中,即使一切顺利,钻具在孔内上下至少也需6道工序,费时、费力又费物,极为繁琐。钻孔深度浅还可以,若在几百米甚至超千米的深孔中获取定向岩芯,难度将可想而知,由于钻孔较深,对定向器耐温、耐压的要求将会更高。

由于超声波钻孔电视具有较好的定向功能,利用该设备将能很方便地对岩芯进行定向,特别是在深孔中更能显现出其特长。根据测试结果,便可很容易的确定每条裂隙的倾向、倾角和走向以及层间厚度。然后根据某条裂隙的深度位置即可获得某深度段的定向岩芯。该方法简而易行、快而准确。利用该方法,对房山300 m和三峡800 m钻孔进行了某些深度段的岩芯定向,取得令人满意的结果,为声发射(AE)地应力测量提供了可靠的数据。该方法大大节省了人力、物力,提高了工作效率及测量精度。

3 最大水平主应力方向的测定

现今地壳最大水平主应力方向可用多种方法获取,但用超声波钻孔电视测定现今最大水平主应力方向是本文的重点,它主要是通过对水压致裂诱发裂缝和孔壁崩落的测量,来实现现今最大水平主应力方向的测定。关于利用超声波钻孔电视,对水压致裂诱发裂缝进行测试,来获取现今最大水平主应力方向,至今还未曾见到有关报道。

3.1 诱发裂缝的测定

诱发裂缝指的是在地应力测量过程中,用水压致裂法^[9]将完整岩体人为造成裂缝,根据弹性力学理论,该诱发裂缝的走向即为地应力的最大水平主应力方向。对于该裂缝的测定,国际通用的方法是定向印模法,该方法的主要特点是直观,不足之处是费时费力。钻孔电视法是本文所论述的新方法,它主要是利用超声波钻孔电视所获取的孔壁图像,来确定其诱发裂缝的走向即现今最大水平主应力的方向,该方法的主要特点是明了、快捷、简单、省时省力、测试精度高等。现用实例给以说明。

在北京房山一300 m试验钻孔中,首先对钻孔进行全孔测试,然后根据测井结果共选出67个试段利用水压致裂法进行地应力测试,待地应力测试结束后,再利用超声波钻孔电视进行全孔扫描测试,通过对地应力测试前后测井结果的比较发现,大多数地应力测试段深度范围内均具有清晰、完整地诱发裂缝(见图4(a)),这一测试结果在国内地应力测量中实属首例。根据图4(a)中两条竖直裂缝所对应的方位,计算出其走向,即为最大水平主应力方向。本次共获得清晰的诱发裂缝57段,其裂缝长度主要取决于试验段的长度,试段越长诱发裂缝相对也越长,反之则越短。将所测定的57段裂缝走向示于图中,即可得到测试钻孔周边区域的最大水平主应力方向随深度的变化(见图4(b)),图中裂缝走向负(—)为北西(NW),正为北东(NE)。从图4的测试结果可看出该孔的最大水平主应力方向,由于受地形地貌和岩石结构的影响,最大水平主应力方向基本上在30°范围内变化,钻孔电视获取的最大水平主应力方向,经加权平均计算结果约为N8°W。另外,水压致裂法地应力测量后,用定向印模法对以上大部分测段进行了测试,最大水平主应力方向结果约为N10°W。通过对比发现两种方法测试结果仅相差2°,则说明结果完全一致。另外57段定向印模所用的时间约为10 d,而超声波钻孔电视仅1 d就顺利地完成了整孔测试,节省了大量人力物力和时间,提高了工作效率,降低了项目的经营成本。

表 1 孔壁崩落法和定向印模法所获取的最大水平主应力方向数据

Table 1 Orientations of the principal horizontal stress attained from the borehole wall breakout method and fracture impression method

序号	深度/m	钻孔崩落法 S_H 方向/(°)	序号	深度/m	定向印模法 S_H 方向/(°)
1	454~459.2	N75° W	1	154~155	N71° E
2	462.5~471	N71° E	2	254~255	N63° W
3	570~572	N70° E	3	331~332	N56° E
4	576.5~578.5	N76° E	4	390~391	N63° W
5	504~617	N87° E	5	555~556	N29° W
6	622~626	N78° E	6	639~640	N60° W
7	654~673	N65° W	7	669~670	N68° W
8	712~716.5	N65° W	8	755~756	N70° W
9	722~741	N64° W	9	774~775	N80° W
10	746.2~751	N69° W			
11	756.5~758	N76° W			
12	761.5~770	N77° W			

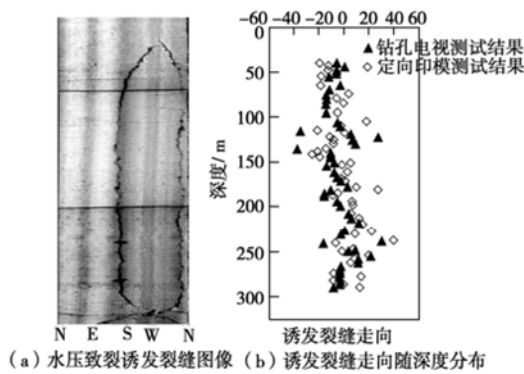


图 4 最大水平主应力方向随深度分布

Fig. 4 Distribution of the maximum principal stress vs. depth

3.2 孔壁崩落

孔壁崩落是孔壁周围由于环状压应力集中所形成的一种岩石剪切破裂。由应力引起的孔壁崩落问题, 在世界地学和岩石力学范围内一直受到关注。自从 1979 年 Bell 和 Gough^[10]首先讨论孔壁崩落形成的力学机制以来, 又有不少学者对此做了进一步的研究, 如 Zoback 等^[11]都在室内外做了一定的研究和探讨。与此同时, 我们在我国云南剑川一口 800 m 地应力测量钻孔中用超声波钻孔电视观测到了孔壁崩落^[12], 后来又在四川自贡、湖北三峡等地相继获得了孔壁崩落资料。在此期间还进行了大量的室内研究和试验, 证实了孔壁崩落方向可以忠实地反映最小水平主应力方向, 而且还对孔壁崩落的域破坏理论进行了研究^[13]。下面依据三峡地区一 800 钻孔为例, 将孔壁崩落法和定向印模法所取得的最大水平主应力方向进行对比。其数据结果见表 1。

将其数据用图形表示 (图 5) 更为直观。由图可知孔壁崩落法所测定的最大水平主应力优势方向为 S70° W—N64° W, 数值平均为 N68° W; 定向印模法所测定的最大水平主应力优势方向为 S56° W—N29° W, 数值平均为 N68° W, 相比两种方法测定的结果完

全一致, 而孔壁崩落法所测结果相对较为稳定, 偏差较小。因此可认为孔壁崩落法是在深孔中测定最大水平主应力方向的一种简单易行的好方法。

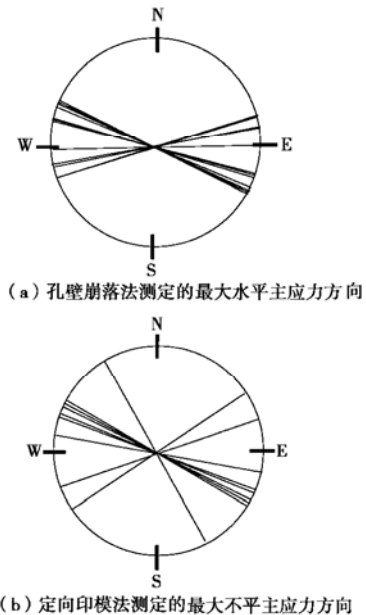


图 5 孔壁崩落法和定向印模法两种测试结果的比较

Fig.5 Comparison of measured results between borehole breakout method and fissure impression method

4 地应力值大小的测定与展望

对地应力值大小的测定方法很多, 如套芯解除法、水压致裂法、AE 法和应变法等, 但目前国内外比较成熟而公认的方法有套芯解除法和水压致裂法。套芯解除法地应力测量国外 20 世纪 30 年代国内 60 年代就已开展了研究和测量, 在实际测量中由于该方法仅能在完整岩体中进行, 成功率较低, 再加上钻探测试中的电缆布设和信号的传输问题, 测量深度受到了很大限制。目前的测试深度多为几十米, 最深也仅为百米。水压致裂法地应力测量不存在孔底电缆及信号的传输问题, 测量深度可大大提高, 现已可达 5375 m^[14]。但

随着钻孔深度的不断加深,通常的水压致裂法地应力测量的设备又受到了温度和压力的限制。为测定地壳更深处的地应力状态,国际和国内的科技人员从20世纪80年代就开始对孔壁崩落的力学机制进行了室内外的科学研究,根据孔壁崩落的形态(即崩落方向、宽度和纵向深度),结合实际岩石结构推断地壳深处的地应力量值,并取得了一定进展和成果。展望未来,利用超声波钻孔电视所测定的孔壁崩落及丰富地地理信息数据,不仅能获得地壳更深部的地应力方向和量值的大小,还可获得更多目前常规测试仪器测试不到的地球物理资料,将为地球物理勘探做出更大贡献。

参考文献:

- [1] 薛梅, 楚泽涵, 姜皓. 声波测井仪器发展评述[J]. 石油仪器, 2000, 14(5): 6 - 10. (XUE mei, CHU Ze-han, JIANG Hao. Development and evaluation of the acoustic well logging tools[J]. Petroleum Instruments, 2000, 14(5): 6 - 10. (in Chinese))
- [2] 毛吉震. 超声波成像钻孔电视及其在岩石工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(3): 247 - 60. (MAO Ji-zhen. Ultrasonic imaging borehole TV and its application to rock engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, 13(3): 247 - 260. (in Chinese))
- [3] ZEMANAK J R, GLENN E E, NORTON L J, et al. Formation evaluation by inspection with the borehole televiewer[J]. Geophysics, 1970, 35(2): 245 - 269.
- [4] ZAI Qing-shan, SPRINGGER J E, ZOBACK M D. Analysis of fractures from borehole televiewer logs in a 500 m deep hole at Xiaguan of Yunnan province in southwest China[J]. Phys Chem Earth, 1989, 17: 199 - 206.
- [5] 苏锐, 宗自华, 王驹. 高分辨率声波钻孔电视及其在核废物地质处置深部岩体研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2923 - 2928. (SU Rui, ZONG Zi-hua, WANG Ju. Acoustic borehole televiewer with high resolution and its application to deep formation for geological disposal of nuclear waste[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2923 - 2928. (in Chinese))
- [6] 张伯崇, 李方全, 佐佐木俊二, 等. 水压致裂裂缝的形成和扩展研究[M]. 北京: 地震出版社, 1999: 110 - 121. (ZHANG Bo-chong, LI Fang-quan, SASAKI S, et al. Evaluation of fracture initiation and extension created by hydraulic fracturing[M]. Beijing: Seismological Press, 1999: 110 - 121. (in Chinese))
- [7] 李方全, 张伯崇, 苏恺之. 三峡坝区水库诱发地震研究—茅坪钻孔的现场测试与分析[M]. 北京: 地震出版社, 1993: 62 - 79. (LI Fang-quan, ZHANG Bo-chong, SU Kai-zi. Reservoir induced earthquake risk in the Three Gorges dam area—in situ tests in borehole at Maoping and analysis[M]. Beijing: Seismological Press, 1993: 62 - 79. (in Chinese))
- [8] 李方全, 张伯崇, 祁英男, 等. 中国三峡地区地下800 m深部地应力测量——中日合作AE法与水压致裂法的比较研究[M]. 北京: 地震出版社, 1992. (LI Fang-quan, ZHANG Bo-chong, QI Ying-nan, et al. In-situ stress measurement at 800 m in depth at Three Gorges site in China between Sino-Japan joint research comparison AE method and hydraulic fracturing method[M]. Beijing: Seismological Press, 1992(in Chinese))
- [9] HAIMSON B C. Near-surface and deep hydrofracturing stress measurement in the Waterloo Quartzite Int[J]. J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1980, 17: 81 - 88.
- [10] BELL J S, GOUGH D I. The use of borehole breakouts in the study of crustal stress[C]// Hydraulic Fracturing Stress Measurements Workshop. National Academy Press, 1983: 201 - 209.
- [11] ZOBACK M D, et al. Well bore breakouts and in-situ stress[J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90(B7): 5523 - 5530.
- [12] 翟青山, 毛吉震, 张均, 等. 根据钻孔崩落资料确定剑川地区应力场方向[J]. 地震地质, 1989, 11(2): 46 - 52. (ZAI Qing-shan, MAO Ji-zhen, ZHANG Jun, et al. Contemporary orientation of tectonic stress field in the Jian-chuan determined from the borehole breakouts[J]. Seismology and Geology, 1989, 11(1): 46 - 52. (in Chinese))
- [13] 阮小平, 毛吉震, 崔占桃. 孔壁崩落的实验研究与分级破坏模型[J]. 地震学报, 1992, 14(4): 493 - 499. (RUAN Xiao-ping, MAO Ji-zhen, CUI Zhan-tao. Experimentation of well bore breakouts and classification breach model[J]. Acta Seismologica Sinica, 1992, 14(4): 493 - 499. (in Chinese))
- [14] HUBER K, FUCHS K, PALMER J, et al. Analysis of borehole televiewer measurements in the Voroshilov drillhole, Russia: first results[J]. Tectonophysics, 1997, 275: 261 - 272.