

# 套芯法、水压致裂法原地应力测量、 钻孔崩落及震源机制解分析 所得结果的对比

李方全

(中国北京 100085 国家地震局地壳应力研究所)

## 摘 要

我国已积累了大量震源机制解资料,近年来为各种目的开展了套芯法及水压致裂法原地应力测量,并从一些深钻井的测井资料中获得了一批钻孔崩落数据,为地壳应力状态的研究提供了十分有用的资料。

为了进行区域构造应力场的研究,笔者对上述各种方法的测量结果进行了对比研究.在同一个钻孔中用不同的方法进行原地应力测量,如在同一个钻孔中用套芯法及水压致裂法进行观测;用水压致裂法的测量结果与同一钻孔中发现的钻孔崩落资料进行对比.还在相距不远的钻孔中用同样的或不同的方法进行原地应力测量;还将同一地区各种方法所得的资料进行了对比,发现其差异并不很大.这就使我们有可能利用上述各种方法提供的资料来进行区域构造应力场及地壳应力状态的研究。

**关键词** 套芯法; 水压致裂法; 钻孔崩落; 震源机制解; 对比

## 一、引 言

地壳应力状态是地球动力学及地震研究中非常重要的基础资料。

获得地壳应力状态知识的最常用的方法是利用套芯法及水压致裂法作原地应力测量,震源机制及钻孔崩落资料分析。

目前,震源机制解和钻孔崩落资料仅能提供有关应力方向的信息,而不能给出应力值的大小.原地应力测量则能够提供应力的大小及方向.但套芯法只能测量浅部的应力(一般深度小于50m),而水压致裂法可以测量较深处(深达数千m)的应力。

我国已积累了大量的震源机制解资料.近年来为各种目的开展了套芯法及水压致裂法原地应力测量,为地壳应力状态的研究提供了十分有用的资料.在深钻井井径测井及钻孔电视观测中,发现大量由应力诱发的钻孔崩落现象,为地壳应力状态的研究提供了又一有力的佐证。

二、各种方法测量结果的对比

套芯法及水压致裂法是进行原地应力测量最常用的方法(李方全, 1985). 钻孔崩落(Bell and Gough, 1983)及震源机制(Yamakawa, 1971)资料分析对构造应力方向的研究提供了丰富的资料.

原地应力测量资料表明, 一般来说地壳应力值随深度的增加而线性增加, 但主应力的方向随深度变化不大(李方全和刘光勋, 1986).

为了进行区域构造应力场研究, 以及了解各种测量方法测量结果的代表性, 我们将各种测量结果进行对比.

1. 同一测量方法的对比

(1)套芯法 虽然套芯法的每次测量结果一般说来仅代表一个点的应力状态, 但是在一定深度范围内进行多次测量, 其测量结果的统计平均值则具有较好的代表性. 另外, 由于套芯法测量深度较浅, 容易受到地形及地质条件的影响, 因此, 在浅孔中测量应力时, 为了使测量结果具有一定的代表性, 除了测点应选择在岩石完整、地形平坦的地区外, 还应避开大的断裂破碎带.

为了解测量方法的可靠性及测量结果的代表性, 我们在相隔 30m 的两个约 25m 深的钻孔中用套芯法进行了原地应力测量. 测量结果表明主应力的方向均相差不大(表 1).

表1 套芯法测量结果对比

测量地点	岩性及时代	最大主应力 (MPa)	最小主应力 (MPa)	最大主应力方向
滦县 1 孔	奥陶系灰岩	5.8	3.0	N84°E
滦县 2 孔	奥陶系灰岩	6.6	3.2	N89°W

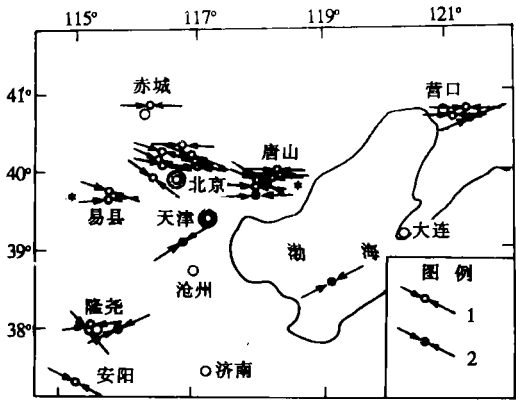


图 1 华北地区最大主应力方向的分布

1. 原地应力测量(\* 为水压致裂法, 其余为套芯法)

2. 震源机制解 P 轴方向

1中画出了华北地区具有代表性的大于 6 级的几个震源机制解的 P 轴).

近年来, 为进行区域构造应力场研究, 我们用套芯法在中国东部地区(包括北京、河北、辽宁、山西、山东、河南、安徽及江苏北部)陆续进行了一些原地应力测量工作. 虽然测量深度并不深(约 15-30m), 但测量资料表明, 各测点的应力值是不相同的, 然而在一些较大的区域内主应力的方向却十分一致. 各测点的应力测量资料见表 2 及李方全和刘光勋(1986). 例如在华北地区, 最大主应力的方向大约为 N65°W 至近 EW 向(李方全和王连捷, 1979)(图 1), 这与华北地区震源机制解 P 轴的方向大体一致.

表 2 华北地区应力测量资料

测量地点	测量时间	测量深度 (m)	岩 性	最大水平主应力 (MPa)	最小水平主应力 (MPa)	最大水平主 应力方向	测量方法及 资料来源
北京顺义 吴雄寺	1977 年 7 月	5—15	奥陶系灰岩	2.70	2.10	N75°W	套芯法、地壳 应力所
北京顺义 吴雄寺	1977 年 10 月	5—15	奥陶系灰岩	2.24	1.40	N60.4°W	同上
北京阳坊	1977 年 11 月	5—15	燕山期花岗岩	0.94	0.66	N60.1°E	同上
河北唐山 凤凰山	1981 年 9 月	5—15	奥陶系灰岩	2.70	1.30	N84°E	同上
河北唐山 赵各庄	1981 年 10 月	11.5—16.5	震旦系灰岩	3.70	2.10	N71°E	同上
河北唐县	1982 年 6 月	6—11.1	奥陶系灰岩	3.70	2.80	N66°W	同上
河南淇县	1982 年 6 月	9—13.4	奥陶系灰岩	3.50	2.20	N82°W	同上
河北涿鹿	1982 年 9 月	7—13.3	石英斑岩	2.60	1.40	N73°W	同上
河北邯郸	1982 年 9 月	8.7—15	奥陶系灰岩	3.50	2.50	N12°W	同上
河北 张家口	1982 年 10 月	21—28	侏罗系凝灰岩	1.60	1.20	N82°W	同上
北京顺义 吴雄寺	1983 年 10 月	5—15	奥陶系灰岩	3.96	1.82	EW	同上
山西灵丘	1984 年	10—18	太古界花岗岩	4.70	2.80	N53°E	套芯法、梁海庆 等(1986)
山西洪洞 万圣寺	1984 年	5.8—13.7	奥陶系灰岩	7.50	5.30	N14°E	同上
山西洪洞 郭盆	1984 年	7—19	二迭系砂岩	4.80	3.20	N18°W	同上

(2) 水压致裂法 我们在浙江海盐靠近海岸的一高约 70m 的小山上的相距约 250m 的两个 250m 深的钻孔中进行了原地应力测量, 两个钻孔孔口标高约为海拔 40m, 钻孔内的岩石为质地坚硬且较为完整的凝灰岩, 测量结果表明, 两个钻孔测得的主应力值及其随深度的变化, 以及主应力的方向均相差不大(图 2)。

在滇西地区, 我们在相距上百 km 的四个测点进行了水压致裂法原地应力测量, 各测点的测量深度约为 500m 至 800m。虽然各测点的主应力值及其随深度变化的梯度是不同的, 但最大水平主应力的方向却大致相同。下关最大水平主应力方向为 N20°E, 永平为 N31°E, 剑川为 N15°E, 丽江为 N19°E(图 3)。

(3) 钻孔崩落 70 年代以来, 许多从事地球物理及地球动力学研究的学者根据对大量石油钻井测井资料的分析发现, 一口油井多段孔壁崩落以及同一地区多口油井孔壁崩落, 具有相同的崩落方位。例如, 位于唐山东南大约 60km 的高尚堡的石油钻孔高 7 号, 在 2000—4000m 深度范围内, 尽管岩石性质和地层结构有较大变化, 但从所得的 101 个钻孔崩落资料可以看出, 其长轴方向为 N10°E—N20°W, 即最大主应力方向为 N80°W—N70°E, 平均最大主应力方向为 N85°E。表明钻孔崩落的长轴方向, 也就是说最大主应力的方向随深度变化是不大的(郭启良等, 1986)。华北的黄河三角洲地区的 65 口石油钻井的钻孔崩落资料表明, 这一地区最大水平主应力方向几乎都处于 NEE 和 SEE 之间, 平均为 N85°E(图 4; 丁健民等, 1988)。

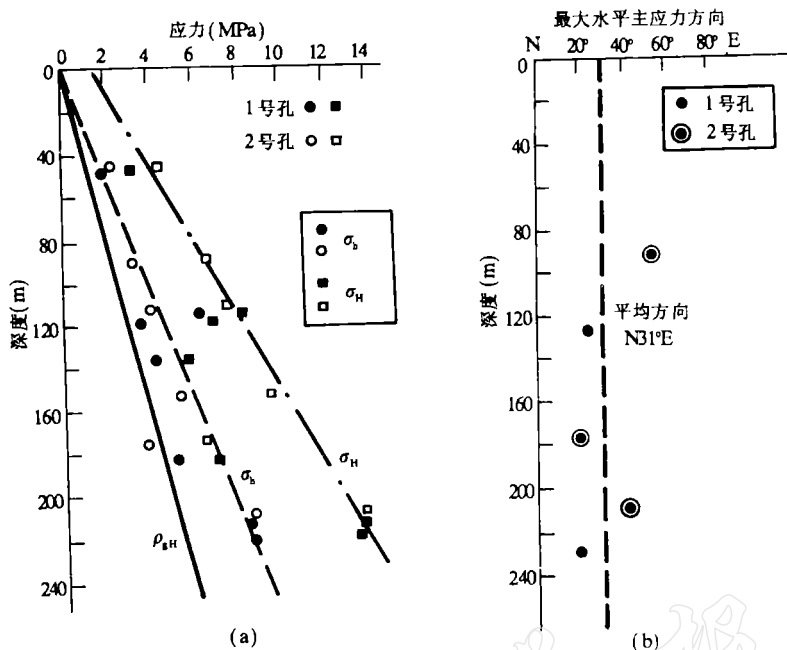


图2 1号孔及2号孔中原地应力随深度的变化

(a) 主应力值; (b) 最大水平主应力方向

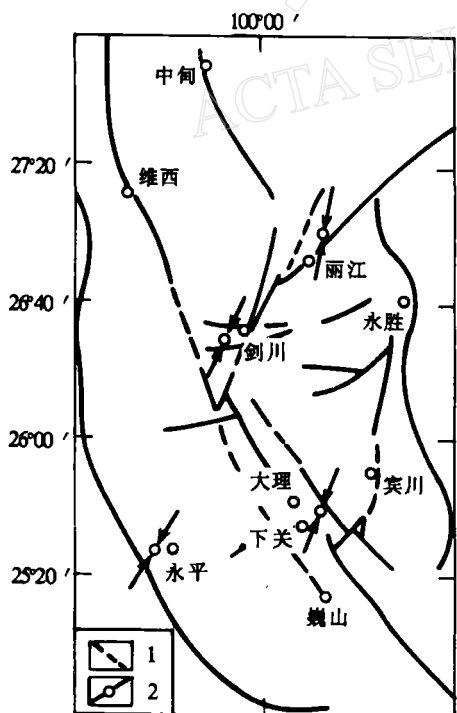


图3 滇西水压致裂法原地应力测量结果

1. 断层, 2. 最大水平主应力方向

(4) 震源机制解 很多地震学者对震源机制进行了详细的研究, 发现震源机制解的  $P$  轴 (主压应力轴) 方向具有明显的区域特征. 例如在秦岭—大别山以北的华北地区, 近年来强震频繁发生, 而这一系列强烈地震所显示的主压应力轴的方位是非常一致的. 华北地区近年来所发生的地震, 特别是几个 7 级左右的大地震, 不但主压应力轴走向非常一致, 即均为 NEE-SWW 方向 ( $N70^\circ E$  左右). 同水平面的夹角都小于  $20^\circ$ , 而且张应力轴 ( $T$  轴) 的走向及仰角也都很一致 (鄯家全等, 1979). 整个华北地区内小地震的综合断层面解一致性也较好. 在研究华北地区地壳应力场问题上, 它们总体上的有效性与 6 级以上大地震的断层面解相差不多, 并且两者的结果也基本一致. 这是因为, 虽然每个地震很小, 受到其小孕震区中各种复杂的局部条件的影响, 但对大量小地震进行统计处理得到的综合断层面解, 却把在一定程度上控制所有这些地震的基本应力场突出出来了 (杨理华和李钦祖, 1980).

## 2. 不同测量方法测量结果的对比

(1) 套芯法与水压致裂法 为了与水压致裂法应力测量结果进行比较, 我们曾同时在同一地点进行了套芯法原地应力测量. 在河北易县, 我们在同一钻孔中用两种方法测量了不同深度的应力状态. 套芯法测量得到的最大及最小水平主应力值随深度的变化关系为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_H &= 3.4 + 0.030D \quad (\text{MPa}) \\ \sigma_h &= 2.5 + 0.030D \quad (\text{MPa}) \end{aligned} \right\} (10\text{m} < D < 70\text{m})$$

最大主应力方向为  $N64^\circ W$ . 水压致裂法测得结果为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_H &= 4.9 + 0.028D \quad (\text{MPa}) \\ \sigma_h &= 2.6 + 0.021D \quad (\text{MPa}) \end{aligned} \right\} (18\text{m} < D < 90\text{m})$$

最大主应力方向为  $N80^\circ E$ . 式中  $\sigma_H$  为最大水平主应力,  $\sigma_h$  为最小水平主应力,  $D$  为深度 (以  $m$  为单位). 两种测量方法测得的测值随深度增加的速率基本上是一致的, 最大主应力方向也相近, 与华北地区其它测点的原地应力测量结果是一致的 (李方全等, 1984).

在江苏新沂, 分别在相邻的几个钻孔内进行了两种不同方法的原地应力测量, 两种方法测得新沂红色砂岩内的应力值随深度增加的趋势基本上是一致的. 套芯法测得的最大水平主应力的平均方向为  $N35^\circ E$ , 水压致裂法测得的最大水平主应力的平均方向为  $N25^\circ E$ , 两者较为一致 (李方全等, 1986).

陕西安康水电站火石岩坝址区布设了 3 个套芯法应力测量点: 两个布设在左坝肩与 5 号灌浆硐内, 这两个钻孔相距约 30m; 另一个套芯法测点布设在汉江河谷地面厂房附近, 该测点距 5 号硐约 170m, 5 号硐高出河谷地面 20m. 另一个水压致裂应力测量钻孔布置在右坝肩上, 孔深 175m, 孔口高出河谷地面约 50m, 距汉江河谷地面厂房测点约 200m. 这 4 个测点约成一条直线并垂直于汉江河谷, 岩石均为绢绿千枚岩. 3 个套芯法测点测得的最大水平主应力方向分别为  $N69^\circ W$ ,  $N63^\circ W$  及  $N53^\circ W$ ; 水压致裂法测得的最大水平主应力方向为  $N73^\circ W$  测量结果也相当一致 (孙世宗等, 1988).

(2) 原地应力测量与钻孔崩落 我们在云南剑川同一钻孔中用井下电视钻孔崩落资料确定的最大水平主应力方向为  $N20^\circ E$ , 而用水压致裂法确定的方向为  $N15^\circ E$ , 相差仅 5 度 (翟青山等, 1989). 在丽江的同一钻孔中用水压致裂法测得的最大主应力方向为  $N19^\circ E$ , 而用钻孔崩落资料求得的为  $N11^\circ E$ , 两者相差仅 8 度. 由图 4 亦可看出, 在一个地区, 钻孔崩落资料与套芯法测得的结果也是相当一致的.

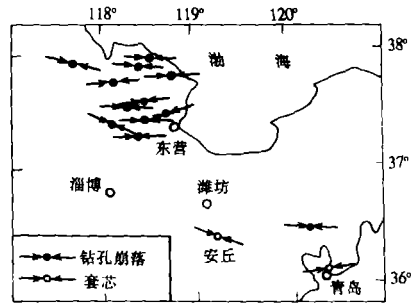


图 4 黄河三角洲及其附近地区最大主应力方向的分布

(3) 震源机制解与原地应力测量结果 由图 1 可以看出, 在华北地区, 应力测量结果最大水平主应力方向为 NWW-近EW, 震源机制解的主压应力轴为 NEE 向, 两者相差大约 20 度. 然而在太行山以西的山西地堑区, 发现原地应力测量测得的最大水平主应力方向与华北地区大不一样, 成了近 NS 向. 而震源机制解在这一地区也发生了较大变化, 与原地应力测量结果十分相似(图 5; Li and Liu, 1986).

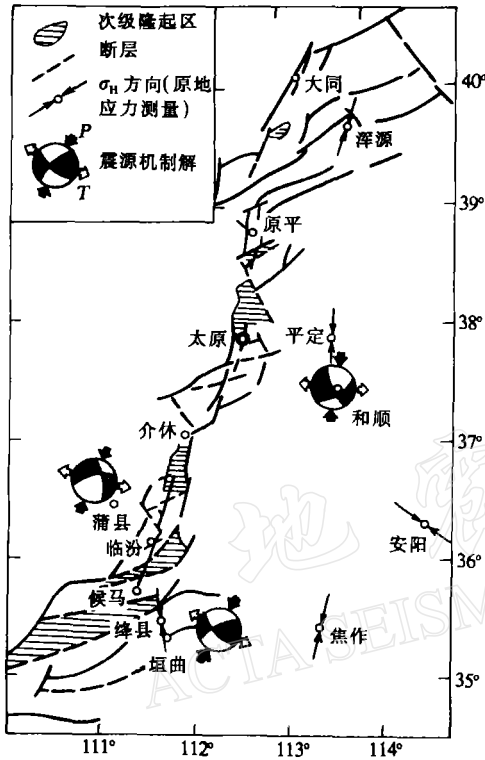


图 5 山西地堑区原地应力测量最大水平主应力方向与震源机制解主压应力轴方向的分布  
反映了各种测量方法测得结果的一致性(李方全等, 1985).

图 5 中只画出了山西 3 个有代表性的地震震源机制解(杨理华等, 1980). 根据山西地震局作的小地震综合断层面解, 1976 年山西太原  $P$  轴方位为  $189^\circ$ ; 山西大同  $P$  轴方位为  $19^\circ$ . 另据山西省地震局对 1965—1981 年山西地区部分地震 ( $3.5 \leq M_L \leq 5.5$ ) 的震源机制解资料统计, 33 个地震所解得的  $P$  轴方向有 70% 以上为 NE-SW 或 NNE-SSW. 许忠淮等(1983)利用多个小地震的推断结果发现, 呼和浩特、晋北、晋中及晋南(2)区平均  $P$  轴的方位角皆较小, 约  $50^\circ$  左右. 这些都说明山西的构造应力方向与太行山以东的华北平原区有较大差别.

(4) 各种测量方法的综合比较 在华北地区有大量的震源机制解及套芯法原地应力测量资料, 也有几个钻孔的水压致裂法原地应力测量资料和一些钻孔崩落资料. 这些资料都反映华北地区的主压应力方向为近 EW 向. 唐山地区各种测量方法测得的最大水平主应力方向的分布(图 6),

### 三、结 语

通过各种测量方法测得结果的对比, 发现在同一地区各种方法得到的应力状态资料差异并不很大, 特别是主应力方向, 在一个地区各种测量方法测得的结果十分一致. 这就使我们有可能利用上述各种方法所提供的资料来进行区域构造应力场及地壳应力状态的研究.

上述资料表明, 尽管在一些地区存在局部异常, 但是在某些广阔的地区上, 水平主应力的方向看来是有一定分布规律的. 在一个相当大的区域内, 现今构造应力的方向是相对稳定的, 并与地质构造和现代地壳运动有着密切的关系.

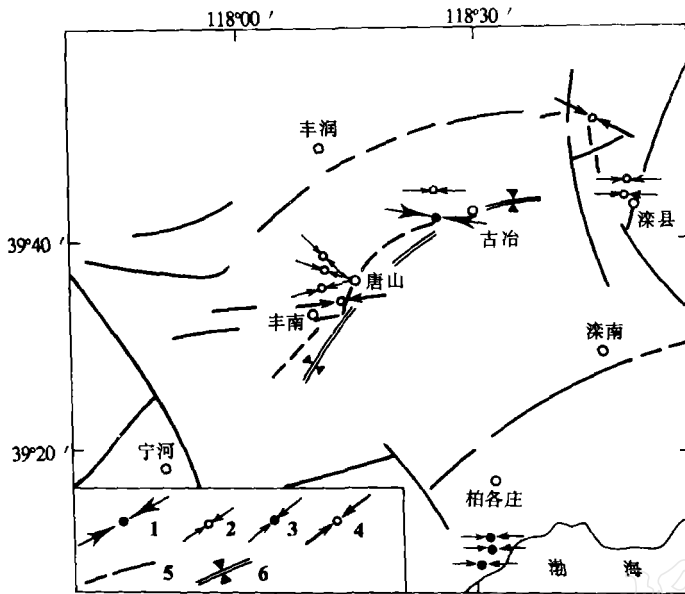


图6 唐山地区各种方法得到的最大水平主应力方向的分布

1. 水压致裂法, 2. 套芯法, 3. 钻孔崩落, 4. 震源机制解, 5. 断层, 6. 向斜

### 参 考 文 献

- 丁健民、王世顺、刘泽凯、毛致新、梁国平、郭启良、高健理, 1988. 关于胜利油田水力压裂和孔壁崩落应力测量结果及其应用问题. 地壳构造与地壳应力文集, 2, 28-42. 地震出版社, 北京.
- 郭启良、丁健民、梁国平, 1986. 根据钻孔崩落椭圆确定唐山地区深部地壳应力方向. 中国地震, 2, 3, 54-59.
- 李方全、王连捷, 1979. 华北地区地应力测量. 地球物理学报, 22, 1, 1-8.
- 李方全、李延美、王恩福、翟青山、毕尚煦、张钧、刘鹏、魏庆云、赵仕广, 1984. 水压致裂法原地应力测量试验. 地应力研究文集, 9-17. 地震出版社, 北京.
- 李方全, 1985. 地应力测量. 岩石力学与工程学报, 4, 1, 95-111.
- 李方全、张钧、刘鹏、毕尚煦、毛吉震、赵仕广, 1985. 唐山地区深部应力测量. 华北地震科学, 3, 3, 44-52.
- 李方全、刘光勋, 1986. 我国现今地应力状态及有关问题. 地震学报, 8, 2, 156-171.
- 李方全、翟青山、毕尚煦、刘鹏、张钧、赵仕广, 1986. 水压致裂法原地应力测量及初步结果. 地震学报, 8, 4, 431-438.
- 梁海庆、杨增学、郭启良, 1986. 山西地堑系现今构造应力场特征. 地震, 1, 47-52.
- 孙世宗、安其美、黄一和, 1988. 安康水电站地应力测量研究. 地壳构造与地壳应力文集, 2, 50-58. 地震出版社, 北京.
- 许忠淮、阎明、赵仲和, 1983. 由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向. 地震学报, 5, 268-279.
- 鄢家全、时振梁、汪素云、环文林, 1979. 中国及邻区现代构造应力场的区域特征. 地震学报, 1, 9-24.
- 杨理华、李钦祖, 1980. 华北地区地壳应力场, 82-91. 地震出版社, 北京.
- 翟青山、毛吉震、张钧、魏庆云、李方全, 1989. 根据钻孔崩落资料确定剑川地区应力场方向. 地震地质, 11, 2, 46-52.
- Bell, J. S. and Gough, D. I., 1983. The use of borehole breakouts in the study of crustal stress. Zoback, M. D. and Haimson, B. C. (eds.), *Hydraulic Fracturing Stress Measurements*, 201-209. National Academy Press, Washington, D. C.
- Li, F. and Liu, G., 1986. Stress state in the upper crust of the China mainland. *J. Phys. Earth*, 34, Suppl., S71-S80.
- Yamakawa, N., 1971. Stress field in focal regions. *J. Phys. Earth*, 19, 347-353.