

# 中国大陆科学钻主孔现今地应力状态

王连捷<sup>1</sup>, 崔军文<sup>2</sup>, 张晓卫<sup>2</sup>, 唐哲民<sup>2</sup>, 李朋武<sup>2</sup>, 李双林<sup>3</sup>

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

3. 胜利石油管理局测井公司, 山东东营 257001

**摘要:** 用钻孔崩落法确定了中国大陆科学钻探主钻孔 5 047 m 深度以上的现今地应力状态. 由钻孔声波成像测井资料发现, 科学钻主钻孔在 1 200 m 深度以下出现了钻孔崩落现象. 我们从 1 216 ~ 5 047 m 的深度范围内采集了 143 个钻孔成像测井图象资料, 对钻孔崩落椭圆长轴方位进行了统计, 结果表明崩落椭圆长轴平均方位为  $319.5^\circ \pm 3.5^\circ$ , 最大水平主应力方位平均为  $49.5^\circ \pm 3.5^\circ$ . 利用崩落形状要素(崩落深度和崩落宽度)以及岩石的内聚力和内摩擦角, 估算了 1 269 m 至 5 047 m 范围内 52 个深度上的最大和最小水平主应力的大小. 结果表明, 在浅处 1 216 m 深度, 最大水平主应力为 42 MPa, 最小水平主应力为 30.3 MPa; 在深处 5 000 mm 深度, 最大水平主应力为 160.5 MPa, 最小水平主应力为 120 MPa; 地应力随深度近于线性增加. 据岩石密度测井资料计算了各个深度上静负载应力. 3 个主应力的大小和方向反映出科学钻主孔位置的应力场处于走滑应力状态, 与临近地区地震震源机制解和其他方法得到的应力场一致. 利用声发射法对岩心试件进行了声发射测量, 得到了最大水平主应力幅值, 并与崩落法测量结果进行了对比, 两者十分一致.

**关键词:** 中国大陆科学钻探; 钻孔崩落; 地应力测量; 声发射测量.

中图分类号: P553

文章编号: 1000-2383(2006)04-0505-08

收稿日期: 2006-04-29

## In Situ Stress State in the Main Borehole of the Chinese Continental Scientific Drilling

WANG Lian jie<sup>1</sup>, CUI Jun wen<sup>2</sup>, ZHANG Xiao wei<sup>2</sup>, TANG Zhe min<sup>2</sup>,  
LI Peng wu<sup>2</sup>, LI Shuang lin<sup>3</sup>

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

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

3. Well Logging Company, Shengli Oil Administration, Dongying 257001, China

**Abstract:** The breakouts began to occur under the depth of 1 200 m in the main borehole of Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD), 143 breakout images are collected from acoustic borehole televiewer data between 1 216 m and 5 047 m. The average orientation of breakouts is  $319.5^\circ \pm 3.5^\circ$ . The average orientation of maximum horizontal stress is  $49.5^\circ \pm 3.5^\circ$ . Using breakout parameters measured from borehole breakouts (depth and width of breakout) and rock cohesion and inner friction angle determined from triaxial rock compression and deformation tests, the magnitudes of principal stress are calculated at 52 different depths from 1 269 m to 5 047 m. Overburden stress is calculated using the density logging data. The magnitude of maximum principal stress is determined using acoustic emissions. A comparison of measurement results of acoustic emission and borehole breakouts is carried out, and the results from the two methods are in good agreement. According to the orientations and magnitudes of three principal stresses stress state ( $S_H > S_v > S_h$ ) in the area of CCSD indicates the strike slip stress regime and is coincident with the strike slip stress field observed from earthquake focal plane mechanisms.

**Key words:** Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD); borehole breakouts; rock stress measurement; acoustic emission measurement.

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(No. 2003CB716504); 国家自然科学基金重大项目(No. 40399141); 中国地质调查局地质大调查项目(No. 121201056606); 国土资源部大陆动力学重点实验室基金项目.

作者简介: 王连捷(1933-), 男, 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: wanglj01@sina.com

## 0 引言

中国大陆科学钻探的主孔位于江苏省东海县毛北村,构造位置上处于郯庐断裂附近,在苏鲁-大别高压超高压变质带内.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不可缺少的内容.声波成像测井资料显示,钻孔在 1 200 m 深度以下出现了钻孔崩落现象.理论分析和室内试验已经证明了这种崩落现象是地应力作用的结果.钻孔崩落出现在钻孔壁挤压应力集中处,钻孔壁的压剪破裂导致孔壁剥落,形成椭圆形钻孔.崩落椭圆的长轴平均方位垂直于最大水平主应力方向(Bell and Gough, 1979; Gough and Bell, 1981; Plumb, 1982; Blumling *et al.*, 1983),这已被许多钻井观测资料所证实(Gough and Bell, 1981; Hickman *et al.*, 1985; Vernik and Zoback, 1992),因此,钻孔崩落可作为地应力主方向的指示器.Zoback *et al.* (1985)进一步发展了钻孔崩落理论,指出孔壁附近出现压应力集中区并形成压剪破裂,造成崩落,崩落参数与地应力存在定量关系.Haimson and Herrick(1986)进行了室内实验,结果表明,钻孔崩落的位置和形状与Zoback *et al.* (1985)的理论模型非常一致.证实了崩落椭圆的长轴平均方向垂直于最大水平主应力方向.Zoback *et al.* (1985)的理论模型不仅能利用钻井崩落来确定主应力方向,而且还可确定水平主应力的大小.

钻孔崩落现象已被广泛用来确定地应力状态(Hickman *et al.*, 1985; Plumb and Hickman, 1985; Zoback and Zoback, 1989; Vernik and Zoback, 1992; 王连捷等, 1993; 俞言祥和许忠淮, 1994, 1996; Huber *et al.*, 1997; 崔军文等, 2004; 李明武等, 2005).

本文的目的就是利用中国大陆科学钻探的主孔 1 216 ~ 5 047 m 的钻孔崩落资料来确定最大和最小水平应力方向和大小,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定量化信息.

## 1 钻孔崩落资料的获取

以往多用四臂倾角测井记录获取钻孔崩落的资料,但这种方法只能得到崩落椭圆的长轴和短轴的

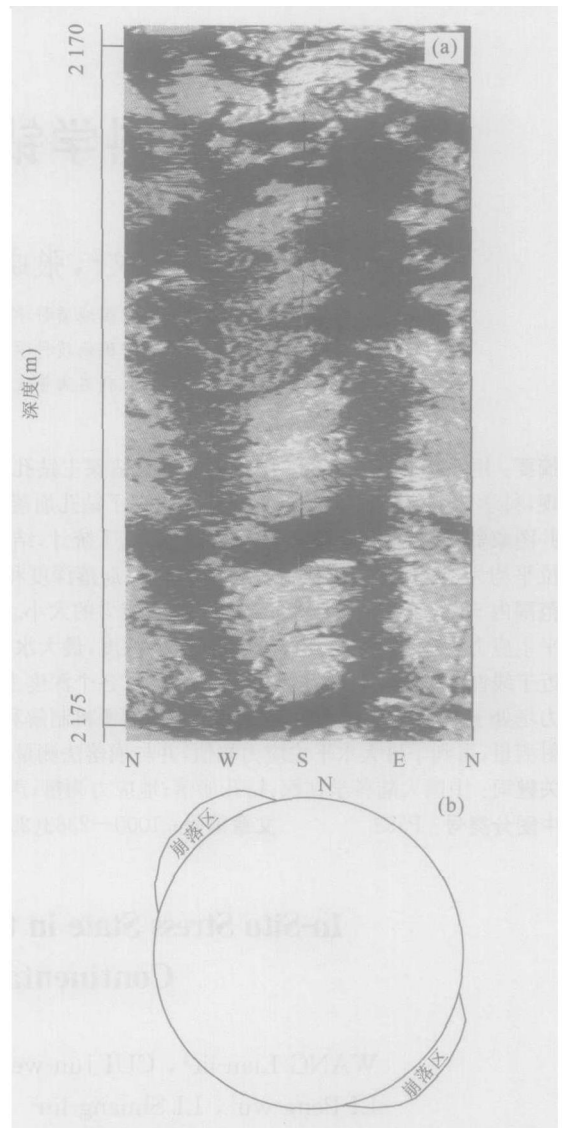


图 1 声波成像测井记录(a)和崩落后的钻井横断面(b)  
Fig. 1 Acoustic borehole televiewer record (a) and section of borehole breakout (b)

长度和方位,不能得到崩落断面的形状.由声波成像测井记录可以得到钻孔崩落断面的详细资料.图 1 为科学钻 2 170 ~ 2 175 m 深度的声波成像测井记录.图 1a 中黑色竖直条带为崩落区,正弦形黑色条带为与钻井斜交的破裂面,上部 2 170 m 附近的多条黑色条带是小裂缝.图 1b 是钻井崩落后的横断面,由图可以看出崩落区的几何形状、崩落的宽度和深度.图 1b 中的崩落区与图 1a 中的黑色竖直条带相对应.根据声波成像测井记录,每隔一定的深度取一个横断面,量测出崩落区的几何形状参数——崩落的宽度和深度,进而计算应力场的方向和大小.

## 2 钻孔崩落的力学分析

假设远场最大和最小水平主应力分别为  $\sigma_H$  和  $\sigma_h$ , 井内泥浆流体对井壁的压力为  $P_w$ , 岩层内孔隙压力为  $P$ , 则井孔周围的应力状态表达式如下 (Jaegr, 1961):

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) \left[ 1 - \frac{a^2}{r^2} \right] + \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left[ 1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right] \cos 2\theta + \Delta P \frac{a^2}{r^2}, \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) \left[ 1 + \frac{a^2}{r^2} \right] - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left[ 1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right] \cos 2\theta - \Delta P \frac{a^2}{r^2}, \quad (2)$$

$$\tau_{\theta} = -\frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left[ 1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right] \sin 2\theta. \quad (3)$$

其中,  $\sigma_r$  为径向应力,  $\sigma_\theta$  为周向应力,  $\tau_{\theta}$  为切向剪应力,  $\Delta P$  为  $P_w - P$ ,  $a$  为井孔半径,  $\theta$  为由最大水平主应力  $\sigma_H$  方位向量测方位的夹角, 逆时针为正.

由式(1)、(2)、(3)可知, 当  $r=a$  时, 即孔壁上,

$$\sigma_r = \Delta P, \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_H + \sigma_h - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - \Delta P, \quad (5)$$

$$\tau_{\theta} = 0. \quad (6)$$

由方程(4)、(5)、(6)可知, 引起钻孔应力集中, 诱发孔壁破坏, 关键是周向应力  $\sigma_\theta$ ,

$$\text{当角度 } \theta=0 \text{ 及 } \pi \text{ 时, } \sigma_\theta = 3\sigma_h - \sigma_H - \Delta P, \quad (7)$$

$$\text{当角度 } \theta=\frac{\pi}{2} \text{ 及 } \frac{3\pi}{2} \text{ 时, } \sigma_\theta = 3\sigma_H - \sigma_h - \Delta P. \quad (8)$$

由式(4)、(7)、(8)可见, 当角度  $\theta=\pi/2$  及  $3\pi/2$  时, 即在  $M$  点、 $N$  点(图 2a), 周向应力  $\sigma_\theta$  值最大, 径向应力  $\sigma_r$  与周向应力  $\sigma_\theta$  的差值  $\sigma_\theta - \sigma_r$  也最大. 可

见, 在  $\theta=\pi/2$  及  $3\pi/2$  的方向, 形成压应力及剪应力集中区(图 2b). 当应力达到岩石的强度时, 产生孔壁崩落. 崩落后形成的椭圆钻孔, 其长轴方向与最小水平主应力方向平行.

实际情况中, 主应力比值  $\sigma_H/\sigma_h$  为大于 1, 小于 3, 而  $\Delta P$  很小. 由式(7)、(8)可见, 这时钻孔附近只有压应力, 没有张应力, 因而, 只有剪破坏, 没有张裂隙.

根据纳维-库仑破坏准则, 在给定的地应力条件下, 井壁发生破坏崩落的条件由下式确定:

$$S_0 = (1 + \mu^2)^{1/2} \left[ \left( \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \right)^2 + \tau_{\theta}^2 \right]^{1/2} - \frac{\mu}{2}(\sigma_\theta + \sigma_r). \quad (9)$$

当上式得到满足时, 即发生崩落, 即上式的右边如果小于左边, 井孔是稳定的, 若右边大于或等于左边, 则发生崩落.

将式(1) - 式(3)代入式(9)并令  $\theta=\theta_b, r=a$  和  $r=r_b, \theta=\pi/2$ , 得到:

$$S_0(a, \theta_b) = \frac{1}{2}[(a_1 + a_2)\sigma_H + (b_1 + b_2)\sigma_h] + e\Delta P, \quad (10)$$

$$S_0(r_b, \pi/2) = \frac{1}{2}[(c_1 + c_2)\sigma_H + (d_1 + d_2)\sigma_h] + f\Delta P. \quad (11)$$

式中:  $a_1 = -\mu(1 - 2\cos 2\theta_b),$   
 $a_2 = \pm(1 + \mu^2)^{1/2}(1 - 2\cos 2\theta_b),$   
 $b_1 = -\mu(1 + 2\cos 2\theta_b),$   
 $b_2 = \pm(1 + \mu^2)^{1/2}(1 + 2\cos 2\theta_b),$   
 $c_1 = -\mu \left[ 1 + 2 \frac{a^2}{r_b^2} \right],$

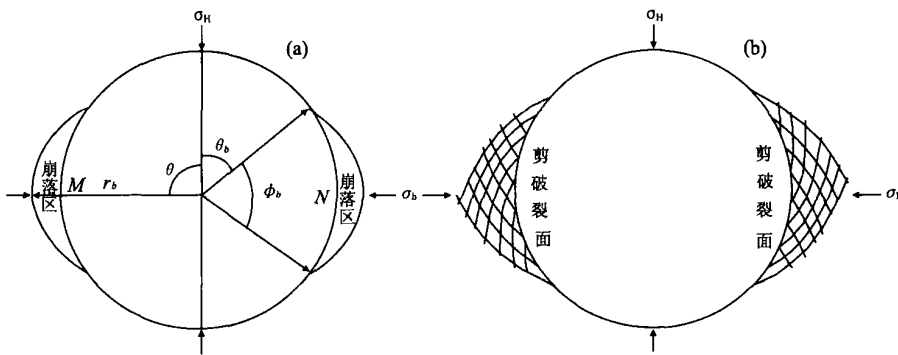


图 2 钻孔崩落理论图

Fig. 2 Sketch of theoretical map for borehole breakout

a. 崩落区位置; b. 压应力集中区剪切破裂面;  $\theta_b$ , 崩落角;  $\varphi_b$ , 崩落跨度或崩落张角;  $\sigma_H$ , 最大水平主应力;  $\sigma_h$ , 最小水平主应力;  $r_b$ , 崩落深度;  $\theta$ , 最大水平主应力方向与崩落区的夹角

$$c_2 \pm (1 + \mu^2)^{1/2} \left[ 1 - \frac{a_2^2}{r_b^2} + 3 \frac{a_4^4}{r_b^4} \right],$$

$$d_1 = - \mu \left[ 1 - 2 \frac{a_2^2}{r_b^2} \right],$$

$$d_2 = \pm (1 + \mu^2)^{1/2} \left[ -1 + 3 \frac{a_2^2}{r_b^2} - 3 \frac{a_4^4}{r_b^4} \right],$$

$$e = \pm (1 + \mu^2)^{1/2},$$

$$f = \pm (1 + \mu^2)^{1/2} \frac{a_2^2}{r_b^2}.$$

当  $\sigma - \sigma_c > 0$  时,  $a_2, b_2, c_2$  和  $d_2$  取正号,  $e, f$  取负号;  $\sigma - \sigma_c < 0$  时,  $a_2, b_2, c_2$  和  $d_2$  取负号,  $e, f$  取正号。

由  $S_0(a, \theta_b) = S_0(r_b, \pi/2)$ , 可以解出 2 个水平主应力  $\sigma_H$  和  $\sigma_h$  (Zoback *et al.*, 1985):

$$\sigma_h = \frac{2[(a_1 + a_2)(S_0 - f\Delta P) - (c_1 + c_2)(S_0 - e\Delta P)]}{[(a_1 + a_2)(d_1 + d_2) - (b_1 + b_2)(c_1 + c_2)],} \tag{12}$$

$$\sigma_H = \frac{2[(d_1 + d_2)(S_0 - e\Delta P) - (b_1 + b_2)(S_0 - f\Delta P)]}{[(a_1 + a_2)(d_1 + d_2) - (b_1 + b_2)(c_1 + c_2)].} \tag{13}$$

### 3 地应力的确定

一点的应力状态可由主应力的方向和大小来决定。确定一点的应力状态就意味着确定主应力的方向和大小。

#### 3.1 主应力方向的确定

在钻孔近于铅直的情况下, 由于井壁崩落椭圆长轴方向平行于最小水平主应力方向, 因此, 可以利用成像测井资料得到的崩落椭圆长轴方向, 经统计平均后, 得到最大水平主应力方向。

#### 3.2 主应力大小的确定

利用泥浆密度资料, 求出井孔压力与地层压力之差  $\Delta P = P_w - P$ 。通过岩石力学试验获得原地岩石的强度参数, 即岩石内聚力和摩擦角, 在崩落椭圆断面上, 量取崩落深度( $r_b$ )和崩落角( $\theta_b$ ), 根据这些数据, 可以利用式(12)、(13)确定现场地应力的大小。

量取崩落深度( $r_b$ )时, 要注意后续崩落扩展对崩落深度的影响。在计算地应力时, 要求使用初始崩落深度。实际情况中, 初始崩落后, 崩落经常继续扩展。崩落扩展对崩落角( $\theta_b$ )影响较小, 但对崩落深度( $r_b$ )的影响较大。因而, 量测初始崩落深度往往比较困难。为此, (1)选择崩落扩展程度小的断面进行计算; (2)

崩落区两侧受后续崩落影响小, 可利用两侧的轮廓线大致恢复初始崩落区的形态, 确定崩落深度。

## 4 大陆科学钻主钻孔现今地应力状态

### 4.1 最大主应力方向的确定

我们在 1 216 ~ 5 047 m 的范围内, 采集了 143 个声波成像测井横断面图像资料, 取得了崩落椭圆长轴方位角和相应的最大主应力方位。对这 143 个数据进行方向随深度分布的统计(图 3)。

由图 3 可以看出崩落椭圆长轴方位随深度略有变化。在 2 600 m 以上, 长轴方位随深度由北向西偏转约  $10^\circ$ , 3 600 m 深度以下, 方位平稳, 并少许向回偏转约  $3^\circ \sim 4^\circ$ 。最大水平主应力方位随深度亦相应偏转。总体来看, 方位随深度变化不大。在 5 000 m 深度范围内, 崩落椭圆长轴方位平均为  $319.5^\circ \pm 3.5^\circ$ , 最大水平主应力方位平均为  $49.5^\circ \pm 3.5^\circ$  (图 4), 可信度为 90%。即 90% 的数据, 其角度变化范围为  $\pm 3.5^\circ$ 。仅有 10% 的情况, 大于  $\pm 3.5^\circ$ 。

由于 2 600 ~ 3 600 m 的成像测井记录质量较差, 未能得到该深度范围的崩落资料。

### 4.2 主应力大小的估算

4.2.1 岩石力学实验 估计主应力的大小时, 需要岩石强度资料。为此, 在主孔采集了有代表性的 12

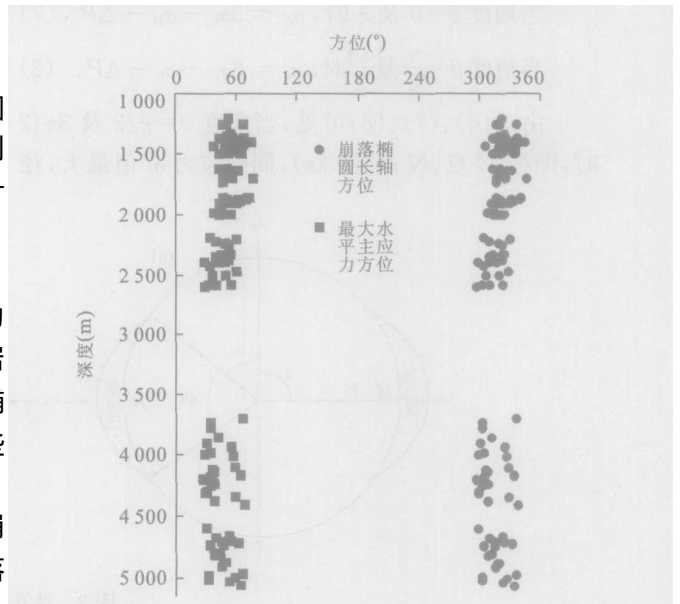
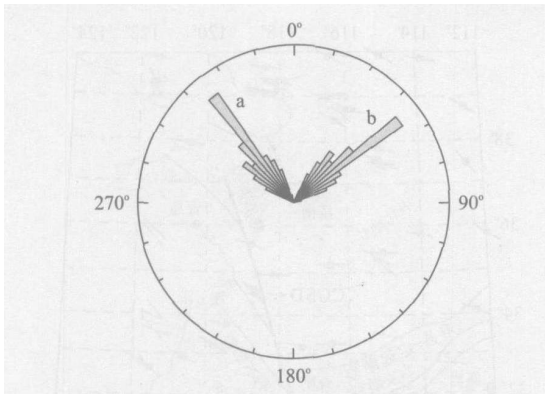


图 3 不同深度的崩落长轴方位与最大水平主应力方位  
Fig. 3 Orientation of breakouts and maximum horizontal principal stress



崩落长轴方位 (a) 与最大水平主应力方位 (b) 玫瑰花图  
 Fig. 4 Rose diagram showing the orientations of breakout (a) and maximum horizontal principal stress (b)

个片麻岩岩石样品、12 个角闪岩样品和 12 个榴辉岩样品进行了岩石力学试验。

根据岩石力学实验结果, 片麻岩岩石内聚力平均为 19.20 MPa, 角闪岩为 22.39 MPa, 榴辉岩为 24.77 MPa, 相应地, 岩石内摩擦角分别为 51.5°、48.6°和 51.9°, 摩擦系数  $\mu$  分别为 1.258、1.134 和 1.275, 平均单轴破坏强度分别为 110.03 MPa、118.56 MPa 和 143.47 MPa。

**4.2.2 主应力大小的估算** 我们对铅直应力大小进行了估算。由于井孔近乎直立, 其中一个主应力为铅直的。铅直应力可用上覆岩层载荷来计算。计算公式如下:

$$S_v = \rho g H .$$

其中:  $\rho$  为岩石的平均密度,  $g$  为重力加速度,  $H$  为深度。

密度由测井资料获得, 取密度  $\rho$  为 2.8 g/cm<sup>3</sup>, 得到的铅直应力如图 5。

**4.2.3 水平主应力大小的估算** 利用声波成像测井图像资料, 在 1 269 ~ 5 047 m 深度上, 测量了 52 钻孔崩落断面的初始崩落深度与崩落张开角。根据前述公式计算了最大 ( $S_H$ ) 和最小 ( $S_h$ ) 水平主应力的大小如表 1 和图 5。图 5 还给出了地应力随深度变化的回归曲线, 其表达式为:

$$S_H = 0.031H + 5.5 ,$$

$$S_h = 0.0229H + 2.5 .$$

由图 5 可以看出地应力随深度增加, 最大水平主应力在 1 269 m 深度为 44.8 MPa, 在 5 000 m 深度为 160.5 MPa, 最小水平主应力相应为 31.6 MPa 和 117 MPa, 3 个主应力的大小关系为:  $S_H > S_v >$

$S_h$ , 表明主孔地应力为走滑应力状态。

**4.2.4 钻孔崩落法与声发射法测量结果比较**

对中国大陆科学钻探主孔的岩心进行了声发射测量 (王连捷等, 2005)。沿钻孔 5 个深度即 301 m, 598 m, 1 003 m, 1 258 m, 1 531 m 分别取样, 每个点 10 个岩样, 进行声发射测量 (丁原辰和张大伦, 1991; 丁原辰, 1992)。将结果列入表 2, 同时放入图 5。由图 5 可以看出, 2 种方法所得结果非常一致。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。两者可以相互验证, 说明测试结果是可靠的。声发射法可以补充浅部资料, 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 大陆科学钻主孔附近地应力格局**

将中国大陆科学钻主孔附近的震源机制解和其他方法所得结果 (Zoback, 1992) 与大陆科学钻主孔

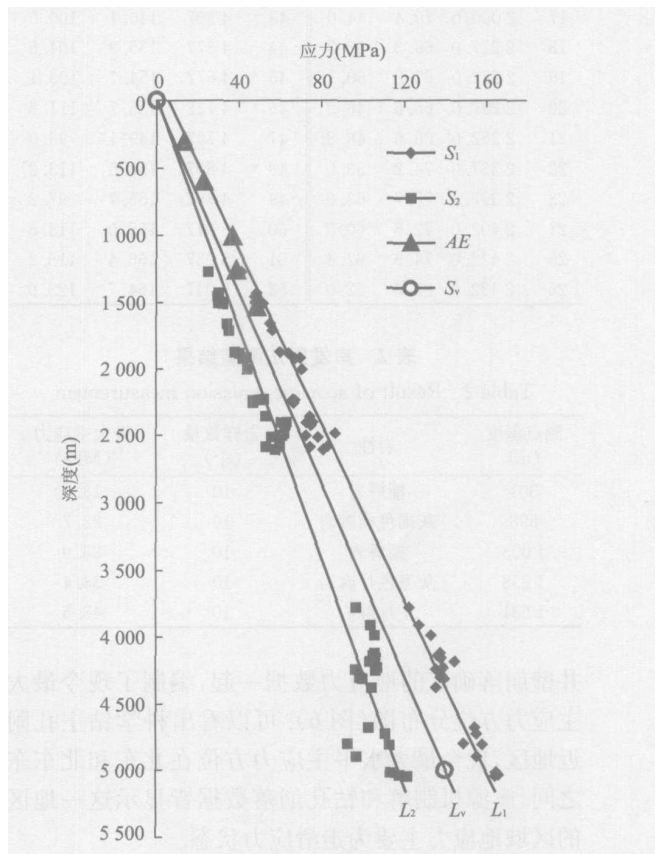


图 5 地应力随深度的变化

Fig. 5 Variation of rock stress with depth  
 $S_1$ , 最大水平主应力;  $S_2$ , 最小水平主应力; AE, 声发射测量;  $S_v$ , 铅直应力;  $L_1$ , 最大水平主应力回归线;  $L_2$ , 最小水平主应力回归线;  $L_v$ , 铅直应力回归线

表 1 最大和最小水平主应力的大小

Table 1 Magnitudes of the maximum horizontal principle stress and minimum horizontal principle stress

序号	深度 (m)	$S_H$ (MPa)	$S_h$ (MPa)	序号	深度 (m)	$S_H$ (MPa)	$S_h$ (MPa)
1	1 269.0	41.4	25.3	27	2 502	72.6	61.0
2	1 430.0	48.4	30.3	28	2 512	78.5	56.1
3	1 454.8	47.6	29.8	29	2 582	83.2	59.9
4	1 491.8	50.8	31.8	30	2 587	74.5	53.2
5	1 493.8	48.0	30.0	31	2 607	81.0	57.6
6	1 495.8	50.8	31.8	32	3 777	122.74	97.2
7	1 498.3	49.2	30.8	33	3 907	127.7	103.9
8	1 500.0	48.0	30.0	34	3 987	133.4	105.9
9	1 502.0	50.0	31.3	35	4 117	137.9	106.0
10	1 505.0	51.6	32.3	36	4 137	136.6	105.0
11	1 655.0	55.2	34.5	37	4 157	138.5	106.5
12	1 706.0	56.4	35.3	38	4 177	145.1	103.6
13	1 870.0	60.0	38.0	39	4 227	139.4	107.2
14	1 879.5	64.0	40.3	40	4 237	135.8	96.9
15	1 914.5	69.6	43.5	41	4 247	138.3	106.4
16	1 918.0	67.0	42.0	42	4 297	138.2	98.7
17	2 000.0	70.4	44.0	43	4 307	140.1	100.0
18	2 227.0	66.3	52.2	44	4 377	135.9	104.5
19	2 232.0	67.2	50.1	45	4 677	154.7	103.1
20	2 237.0	65.6	46.9	46	4 722	155.7	111.3
21	2 252.0	66.6	46.8	47	4 797	149.1	93.0
22	2 357.0	74.2	53.0	48	4 807	158.5	113.2
23	2 397.0	75.7	63.0	49	4 897	155.7	97.2
24	2 402.0	72.6	60.5	50	5 017	165.0	113.8
25	2 422.0	74.9	62.4	51	5 037	166.4	118.2
26	2 482.0	86.8	62.0	52	5 047	164.7	122.0

表 2 声发射法测量结果

Table 2 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
1 003	榴辉岩	10	36.9
1 258	灰黑色片麻岩	10	38.4
1 531	正片麻岩	10	48.5

井壁崩落确定的地应力数据一起, 编制了现今最大主应力方位分布图(图 6)。可以看出科学钻主孔附近地区, 现今最大水平主应力方位在东北和北东东之间。震源机制解和钻孔崩落数据皆显示这一地区的区域地应力主要为走滑应力状态。

周翠英等(1994)利用 1969 年至 1991 年的地震活动资料对大陆科学钻主孔所在位置的苏鲁-南黄海广大地区的地应力场的动态变化进行了研究, 发现该区应力场总体特征为北东东向,  $P$  轴倾角小于  $10^\circ$ 。华爱军等(1997)利用地震活动参数对沂沭断裂

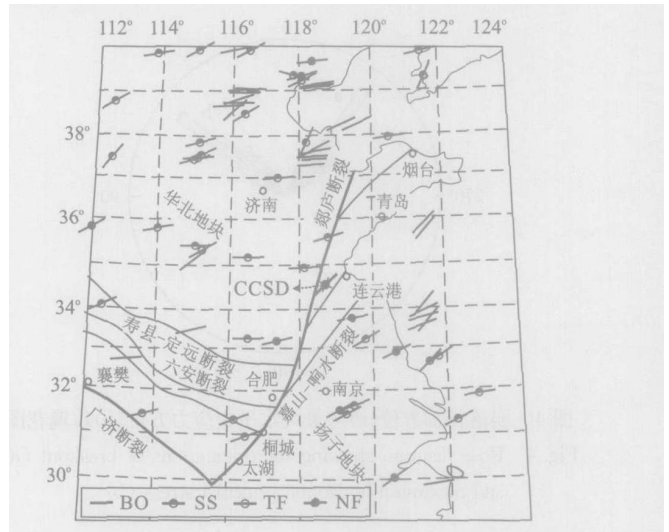


图 6 中国大陆科学钻探(CCS D)主孔位置及钻孔崩落和震源机制解显示的应力格局示意图(钻孔附近地区的地应力资料源于 Zoback et al., 1992)

Fig. 6 Sketch map for the location of Chinese Continental Scientific Drill (CCSD) and stress regime indicated by breakouts and earthquake focal mechanisms

BO 为钻孔崩落指示的最大主应力方向; SS、TF、NF 为震源机制解指示的最大主应力方向和应力格局; SS 为走滑断层作用; TF 为逆冲断层作用; NF 正断层作用

附近应力场动态变化进行了分析, 南段震源机制解  $P$  轴方位 1978—1984 年稳定在  $N72^\circ E$ , 1985 年后, 变为  $N50^\circ E$ 。谢智等(2002)汇编了河南及邻区(山东、河北、安徽)1965—2000 年共 52 次  $M_L \geq 3.5$  的地震震源机制解, 表明  $P$  轴方位多为北东到北东东向, 地震断层主要为走滑类型。

郯庐断裂带在燕山早期为左行平移运动, 在新生带晚近时期的活动则表现为右行扭动(王小风等, 2000)。刘光勋等(1989)、汪一鹏等(1989)也指出郯庐断裂的现今活动为水平右行扭动。中国大陆科学钻主孔地应力状态及附近地区地应力方向与郯庐断裂带晚近时期以来的扭动方向是协调的。

综上所述, 科学钻主孔附近地区地震震源机制解和其他方法得到的结果与钻孔崩落的结果基本一致, 与主要断裂带的活动性质一致。本区现今地应力格局主要为走滑状态, 最大水平主应力方向在东北和北东东之间。

## 6 结论

(1) Zoback and Zoback(1989)对应力方向数据

建立了可靠的定量指标。该指标规定,对于A级质量的钻孔崩落数据,要求崩落出现在钻孔两侧近似对称(相隔 $180^\circ$ )位置,参加方位统计的数量大于10,并贯穿井深300 m以上,标准偏差 $\leq 12^\circ$ 。我们统计的钻孔崩落数量为143个,选取的崩落资料满足两侧近似对称(相隔 $180^\circ$ )的要求,覆盖深度由1 216 m至5 047 m,贯穿井深3 800多m,标准偏差 $\leq 3.5^\circ$ 。因此我们统计的最大主应力的方向是可信的。

(2)地应力大小随深度增加,在浅部1 269 m,最大水平主应力为44.8 MPa,最小主应力为31.6 MPa,在深部5 047 m,最大水平主应力为160.5 MPa,最小主应力为117 MPa。最大水平主应力 $S_H$ 和最小主应力 $S_h$ 大小随深度的增加率为:

$$S_H = 0.031H + 5.5,$$

$$S_h = 0.0229H + 2.5,$$

主应力方向为 $N49.5 \pm 3.5^\circ E$ ,可信度90%。

(3)声发射法与钻孔崩落法测量结果的对比表明两者十分一致,说明地应力的大小及其随深度的变化是可靠的。

(4)综合分析主孔附近地区地震震源机制解等其他方法所得地应力资料,可以看出本区区域现今地应力主方向为北东到北东东向压应力,为走滑型应力状态格局。

(5)所得地应力资料可作为构造动力学和地质灾害研究的基础资料。

致谢:研究过程中得到了中国大陆科学钻探工程中心牛一群研究员、潘和平教授、胜利油田测井公司吴海燕高级工程师的大力支持和帮助,并提供了相关资料,在此表示衷心的感谢。在样品采集和加工过程中,构造岩石编录组、物性研究组和现场蔡慈高级工程师、孙立文工程师和王尧工程师给予的大力支持和帮助,在此也表示诚挚的感谢!

## References

Bell J. S., Gough, D. I., 1979. Northeast southwest compressive stress in Alberta—Evidence from oil wells. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 45: 475 – 482.

Blumling P., Fuchs K., Schneider T., 1983. Orientation of the stress field from breakouts in a crystalline well in a seismic active area. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 33: 250 – 254.

Cui J. W., Wang, L. J., Li, P. W., et al., 2004. Tectonic stress field of brittle deformation within 2 000 m of the main borehole of Chinese Continental Scientific Drilling. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 73 – 80. (in Chinese with English abstract).

with English abstract).

Ding, Y. C., 1992. Rock stress measurement by the AE method and its application in mine. *Coal Engineer*, (4): 50 – 56 (in Chinese with English abstract).

Ding, Y. C., Zhang, D. L., 1991. Application of the incomplete erosion phenomenon in acoustic emission activities to the measurement of geostresses. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 10(4): 313 – 326 (in Chinese with English abstract).

Gough, D. I., Bell, J. S., 1981. Stress orientations from oil well fractures in Alberta and Texas. *Can. J. Earth Sci.*, 18: 638 – 645.

Haimson, B. C., Herrick, C. G., 1986. Borehole breakouts—A new tool for estimation in situ stress. Proceedings of the international symposium on rock stress and rock stress measurements Stockholm, 1 – 3, Sept. .

Hickman, S. H., Healy, J. H., Zoback, M. D., 1985. In situ stress, natural fracture distribution, and borehole elongation in the Auburn geothermal well, Auburn, New York. *Journal of Geophysical Research*, 90: 5497 – 5512.

Hua, A. J., Zhou, C. Y., Liu, X. L., 1997. Traced study on stress field region in Yishu fault zone and Cangshan earthquake of Ms 5. 2. *Journal of Seismology*, (3): 18 – 23 (in Chinese with English abstract).

Huber, K., Fuchs K., Palmer, J., et al., 1997. Analysis of borehole televiewer measurements in the Vorotilov drillhole, Russia—First results. *Tectonophysics*, 275(1 – 3): 261 – 272.

Jaeger, J. C., 1961. Elasticity, fracture and flow. Methuen, London, 212.

Li, P. W., Cui, J. W., Wang, L. J., et al., 2005. The determination of in situ stress from wellbore breakouts in the main borehole of the Chinese Continental Scientific Drilling. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 421 – 426 (in Chinese with English abstract).

Liu, G. X., Ma, T. Z., Huang, P. Y., et al., 1989. Major active faults and their recent movement. In: Lithospheric dynamics atlas of China. China Cartographic Publishing House, Beijing (in Chinese).

Plumb, R. A., 1982. Breakouts in the geothermal well, Auburn, N. Y.. *Eos Trans. AGU*, 63: 1118.

Plumb, R. A., Hickman, S. H., 1985. Stress induced borehole elongation; A comparison between the four arm dipmeter and the borehole televiewer in the Auburn geothermal well. *Journal of Geophysical Research*, 90(B7): 5513 – 5521.

- Vernik, L., Zoback, M. D., 1992. Estimation of the maximum horizontal principal stress magnitude from stress induced wellbore breakout in the Cajon pass scientific research borehole. *Journal of Geophysical Research*, 97( b4): 5109 – 5119.
- Wang L. J., Li, P. W., Cui, J. W., et al., 2005. The determination of in situ stress in the main borehole of the Chinese Continental Scientific Drilling by using acoustic emission. *Geology in China*, 32( 2): 259 – 264 ( in Chinese with English abstract) .
- Wang L. J., Zhang, L. R., Wang, W., et al., 1993. Deep crustal stress measurement by borehole breakouts. In: Science papers on hydrogeology, engineering geology and environmental geology. Seismological Press, Beijing, 63 – 69 ( in Chinese with English abstract) .
- Wang X. F., Li Z. J., Chen, B. L., et al., 2000. Tanlu fault zone. Geological Publishing House, Beijing, China ( in Chinese) .
- Wang Y. P., Deng Q. D., Zhu, S. L., 1989. Lithospheric dynamics of North China. In: Lithospheric dynamics atlas of China. China Cartographic Publishing House, Beijing ( in Chinese) .
- Xie, Z., Liu Y. X., Hu W. J., et al., 2002. The focal mechanism of earthquake in Henan and its adjacent region. *Northwestern Seismological Journal*, 24( 3): 283 – 286 ( in Chinese with English abstract) .
- Yu Y. X., Xu Z. H., 1994. A study on orientations of horizontal principal stress in Jizhong depression using borehole breakout data. *Petroleum Exploration and Development*, 21( 2): 48 – 55 ( in Chinese with English abstract) .
- Yu, Y. X., Xu Z. H., 1996. The inverse of the stress state of upper crust in Jizhong depression using borehole breakout data from inclined well. *Acta Seismologica Sinica*, 18( 2): 246 – 253 ( in Chinese with English abstract) .
- Zhou C. Y., Jiang, Z. F., Wang, H. W., et al., 1994. Dynamic variation of stress field and seismic activity in juncture area of Jiangsu, Shandong and Yellow Sea. *Seismological Research of Northeast China*, 10( 1): 10 – 17 ( in Chinese with English abstract) .
- Zoback, M. L., 1992. First and second order patterns of stress in the lithosphere; The world stress map project. *Journal of Geophysical Research*, 97( B8): 11703 – 11728.
- Zoback M. D., Moos, D., Mastin, L., et al., 1985. Well bore breakouts and in situ stress. *Journal of Geophysical Research*, 90( B7): 5523 – 5530.
- Zoback M. L., Zoback, M. D., 1989. Tectonic stress field of the Continental United States. In: Paiseis L. C., Mooney, W. D., eds., Geophysical framework of the Continental United States, Boulder, Colorado. *Geological Society of America Memoir*, 172: 523 – 539.

### 附中文参考文献

- 崔军文, 王连捷, 李朋武, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔 2 000 m 以上脆性变形构造应力场. *岩石学报*, 20( 1): 73 – 80.
- 丁原辰, 1992. 矿区地应力状态声发射粗估法及其应用. *煤炭工程师*, ( 4): 50 – 56.
- 丁原辰, 张大伦, 1991. 声发射抹录不净现象在地应力测量中的应用. *岩石力学与工程学报*, 10( 4): 313 – 326.
- 华爱军, 周翠英, 刘西林, 1997. 沂沭带应力场动态追踪研究与苍山 5. 1 级地震. *地震学刊*, ( 3): 18 – 23.
- 李朋武, 崔军文, 王连捷, 等, 2005. 中国大陆科学钻探主孔钻孔崩落与现场应力状态的确定. *岩石学报*, 2( 2): 421 – 426.
- 刘光勋, 马廷著, 黄佩玉, 等, 1989. 主要活动断裂及现今运动. 中国岩石圈动力学地图集. 北京: 中国地图出版社.
- 王连捷, 李朋武, 崔军文, 等, 2005. 中国大陆科学钻探主孔声发射法现今地应力状态的确定. *中国地质*, 32( 2): 259 – 264.
- 王连捷, 张利容, 王薇, 等, 1993. 利用钻孔崩落法确定深部地应力状态. *工程地质, 水文地质, 环境地质论文集*. 北京: 地震出版社, 63 – 69.
- 王小凤, 李中坚, 陈柏林, 等, 2000. 郟庐断裂带. 北京: 地质出版社, 322 – 331.
- 汪一鹏, 邓起东, 朱世龙, 1989. 华北地区岩石圈动力学特征. 中国岩石圈动力学地图集. 北京: 中国地图出版社.
- 谢智, 刘尧兴, 胡卫健, 等, 2002. 河南及邻区地震的震源机制. *西北地震学报*, 24( 3): 283 – 286.
- 俞言祥, 许忠淮, 1994. 用钻孔崩落法研究冀中拗陷水平主应力方向. *石油勘探与开发*, 21( 2): 48 – 55.
- 俞言祥, 许忠淮, 1996. 利用斜井钻孔崩落资料反演冀中拗陷上地壳应力状态. *地震学报*, 118( 2): 246 – 253.
- 周翠英, 姜早峰, 王红卫, 等, 1994. 苏鲁交界至南黄海地区应力场的动态变化与地震活动. *东北地震研究*, 10( 1): 10 – 17.