

# 中国大陆科学钻探主孔钻孔崩落与现场应力状态的确定\*

李朋武<sup>1</sup> 崔军文<sup>1</sup> 王连捷<sup>2</sup> 王微<sup>2</sup> 乔子江<sup>2</sup>

LI PengWu, CUI JunWen, WANG LianJie, WANG Wei and QIAO ZiJiang

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

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

2. Institute of Geodynamics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

2005-01-30 收稿, 2005-03-05 改回.

Li PW, Cui JW, Wang LJ, Wang W and Qiao ZJ. 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

**Abstract** The breakouts began to occur under the depth of 1200m in the main borehole of Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD), 82 breakout images are collected from acoustic borehole televiewer data between 1200m and 2010m. The averaged orientation of breakouts is  $324.8^\circ \pm 3.3^\circ$ . The averaged orientation of maximum horizontal stress is  $54.8^\circ \pm 3.3^\circ$ . Using parameters measured from breakouts (depth and width of breakout) and rock cohesive strength determined from triaxial rock compression and deformation test, the magnitudes of principal stress are calculated at 16 different depths of 1269m, 1500m, 2000m and so on. Overburden stress is calculated using the density logging data. According to the orientations and magnitudes of three principal stresses, the least principal stress is horizontal, and stress state ( $S_H > S_v > S_h$ ) determined from the analysis of wellbore breakouts 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), Main borehole, Breakouts, Stress, Strike slip

**摘要** 中国大陆科学钻探主孔在 1200m 深度以下出现了钻孔崩落现象,我们在 1200m 至 2015m 的范围内采集了 82 个钻孔成像测井图象资料。对钻孔崩落长轴方位进行了方向统计,结果表明近似对称的崩落平均方位为  $324.8^\circ \pm 3.3^\circ$ ,对应的平均最大水平主应力方位为  $54.8^\circ \pm 3.3^\circ$ 。利用崩落形状要素(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 1269m、1500m、2000m 等 16 个深度上的最大和最小水平主应力的大小。根据岩石密度测井资料计算了各个深度上静负载应力。三个主应力的大小和方向反映出主钻孔位置的应力场处于走滑应力状态,与地震震源机制解得到的走滑应力场一致。

**关键词** 中国大陆科学钻探;主孔;钻孔崩落;地应力;走滑

中图法分类号 P551

## 1 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,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。根据成像测井资料(井下超声波电视),钻孔在 1200m 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的力学机理:钻孔崩落是最小水平主应力方向上挤压应力最大集中处钻孔壁的压剪破裂导致的剥落现象,是地应力作用的结果。Bell 和 Gough (Bell and Gough, 1979)提出了在钻孔壁挤压应力最大

\* 本文为科技部国家重点基础研究发展规划项目资助(编号 2003CB716500)

第一作者简介:李朋武,男,1965 年 10 月生,博士,研究员,从事地质构造学研究,E-mail lipengwu@cags.net.cn

集中区域通过剪切破碎而形成崩落的理论,崩落的长轴方位垂直最大水平主应力方向,在垂直钻孔中,这意味着崩落将沿着平行于最小水平主应力方向上发生,这被后来的许多钻井观测资料所证实(Vernik and Zoback, 1992; Gough and Bell, 1982; Hickman *et al.*, 1985)。反过来,钻孔的崩落也能作为最大和最小水平主应力方向的指示器。后来, Zoback 等(Zoback *et al.*, 1985)进一步发展了钻孔崩落理论,不仅利用崩落方位来确定主应力方向,而且还可利用崩落形状和岩石强度参数来确定水平主应力的大小。Barton 等(Barton *et al.*, 1988)也指出,钻孔崩落能被用于估计应力幅值。

本文的目的就是利用中国大陆科学钻探的主孔 1200m 至 2000m 的钻孔崩落资料来确定最大和最小水平应力场方向和大小,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。

## 2 方法原理

### 2.1 钻孔崩落方位确定最大水平主应力方向

在钻孔近于直立的情况下,崩落椭圆长轴方位平行于最小水平主应力方向,垂直最大水平主应力方向,因此我们可以利用成像测井资料来量取优势崩落椭圆长轴方向,经统计平均后,可以得到最大水平主应力方向。

### 2.2 钻孔崩落形状反演现场地应力的大小

根据 Zoback 等人(Zoback *et al.*, 1985)提出的模型,在井壁发生破坏处的岩石内聚力和内摩擦角已知的情况下,用崩落深度( $r_b$ )和崩落角( $\theta_b$ )可以确定现场地应力的大小(图 1)。

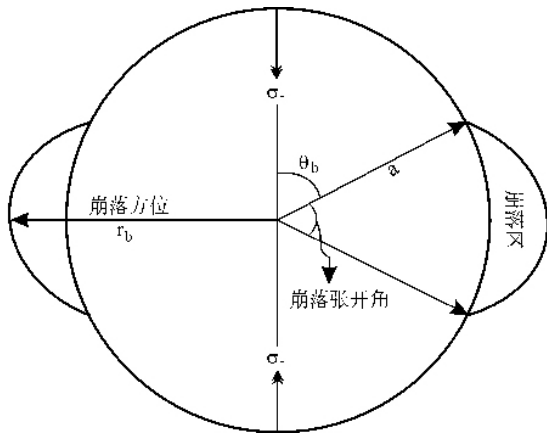


图 1 钻孔崩落理论示意图

Fig. 1 Sketch theoretical map for the breakout

原理如下:

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  $P_w$ ,岩层内流体压力为  $P$ ,则井孔周围的应力状态是沿径向方向离开井轴距离  $r$  的函数,在极

坐标系下的径向应力( $\sigma_r$ )、周向应力( $\sigma_\theta$ )和切向剪应力( $\tau_{r\theta}$ )分量有如下的表达式:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \\ &\quad \left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + P_w \frac{a^2}{r^2} \\ \sigma_\theta &= \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \\ &\quad \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - P_w \frac{a^2}{r^2} \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \end{aligned}$$

其中  $\mu$  为井孔半径,  $\theta$  为自最大水平主应力  $\sigma_H$  方向逆时针测量的方位角。

根据纳维-库仑破坏准则,在给定现场地应力的条件下,井壁发生破坏的最大内聚力值由下式确定:

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

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。

当  $r = a$  或  $\theta = \frac{\pi}{2}$  时,切向剪应力  $\tau_{r\theta} = 0$ , 则得:

$$S_0 = \pm \frac{1}{2}(1 + \mu^2)^{1/2}(\sigma_\theta - \sigma_r) - \frac{\mu}{2}(\sigma_\theta + \sigma_r)$$

将  $\theta = \theta_b$  ( $r = a$ ) 和  $r = r_b$  ( $\theta = \pi/2$ ) 代入,得到:

$$S_0(a, \theta_b) = \frac{1}{2}[(a_1 + a_2)\sigma_H + (b_1 + b_2)\sigma_h] + eP_w$$

$$S_0(r_b, \pi/2) = \frac{1}{2}[(c_1 + c_2)\sigma_H + (d_1 + d_2)\sigma_h] + fP_w$$

其中  $a_1 = -\mu(1 - 2\cos 2\theta_b)$

$$a_2 = \pm(1 + \mu^2)^{1/2}(1 - 2\cos 2\theta_b)$$

$$b_1 = -\mu(1 + 2\cos 2\theta_b)$$

$$b_2 = \pm(1 + \mu^2)^{1/2}(1 + 2\cos 2\theta_b)$$

$$c_1 = -\mu\left(1 + 2\frac{a^2}{r_b^2}\right)$$

$$c_2 = \pm(1 + \mu^2)^{1/2}\left(1 - \frac{a^2}{r_b^2} + 3\frac{a^4}{r_b^4}\right)$$

$$d_1 = -\mu\left(1 - 2\frac{a^2}{r_b^2}\right)$$

$$d_2 = \pm(1 + \mu^2)^{1/2}\left(-1 + 3\frac{a^2}{r_b^2} - 3\frac{a^4}{r_b^4}\right)$$

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

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

式中  $\sigma_\theta - \sigma_r > 0$  时  $a_2, b_2, c_2$  和  $d_2$  取正号,  $e, f$  取负号;  $\sigma_\theta - \sigma_r < 0$  时  $a_2, b_2, c_2$  和  $d_2$  取负号,  $e, f$  取正号。 $\theta_b$  为崩落角(图 1)。

利用泥浆密度值等资料,井孔压力与地层压力之差  $\Delta P = P_w - P$  可求出。若岩石内聚力和内摩擦角已知,则由  $S_0$

$(a \theta_b) = S_0(r_b \pi/2)$ , 可以解出两个水平主应力  $\sigma_H$  和  $\sigma_h$  以及它们的比值：

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

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

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

### 3 数据采集与处理

#### 3.1 最大主应力方向的确定

我们在 1200m 到 2015m 的范围内, 采集了 82 个声波成像测井横断面图象资料。通过对 NW 和 SE 两象限近似对称的崩落优势方位分别进行了测量, 平均后取得了崩落椭圆长轴方位角, 并计算了相应的最大主应力方位(表 1)。对这 82

个数据进行方向统计, 得到平均崩落方位为  $324.8^\circ \pm 3.3^\circ$ , 对应的最大水平主应力方位为  $N54.8^\circ E$ , 置信误差为  $3.3^\circ$ 。图 2 是方向统计玫瑰图。

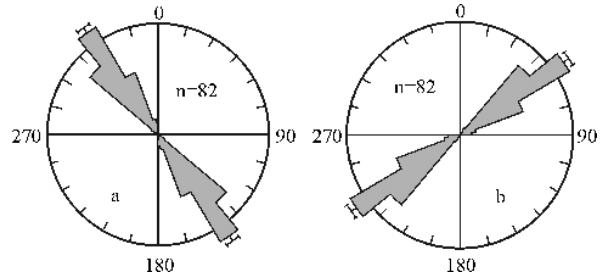


图 2 钻孔崩落和最大水平主应力方位统计玫瑰图  
a 图为钻孔崩落方位统计玫瑰图, b 图为最大水平主应力方位统计玫瑰图

Fig. 2 Rose diagram showing the orientations of breakout (a) and maximum horizontal principal stress (b)

表 1 钻孔崩落长轴方位数据表

Table 1 The orientations of wellbore breakouts

深度 (m)	崩落 方位	最大主应 力方位	深度 (m)	崩落 方位	最大主应 力方位	深度 (m)	崩落 方位	最大主应 力方位
1216.7	322.9	52.9	1466.5	322.5	52.5	1867.5	342.0	72.0
1263	337.3	67.3	1468.5	336.2	66.2	1870.5	340.6	70.6
1269	320.9	50.9	1472	324.4	54.4	1873.5	338.6	68.6
1271	317.4	47.4	1476	357.0	87.0	1876.5	320.8	50.8
1341	324.8	54.8	1478.4	333.5	66.5	1879.5	331.5	61.5
1361	324.7	54.7	1485.4	322.1	52.1	1899.2	322.3	52.3
1365	319.6	49.6	1487.4	318.5	48.5	1901.2	333.0	63.0
1367	321.8	41.8	1491.8	324.2	54.2	1905.2	329.0	59.0
1376.19	317.3	47.3	1493.8	333.5	63.5	1907.2	317.0	47.0
1377.5	312.5	42.5	1495.8	319.2	49.2	1908.5	329.8	59.8
1379.5	326.7	46.7	1498.3	321.7	51.7	1910.5	312.4	42.4
1385.5	337.5	67.5	1500.3	335.0	65.0	1912.5	323.5	53.5
1387.5	318.9	48.9	1502.3	314.7	44.7	1914.5	321.0	51.0
1393.5	356.7	86.7	1505.0	313.0	43.0	1916.0	323.0	53.0
1395	335.0	65.0	1507.0	333.1	53.1	1918.0	322.5	52.5
1403	320.6	50.6	1633.5	321.1	51.1	1986.7	313.7	43.7
1405	345.3	75.3	1637.0	312.8	42.8	1991.4	307.4	37.4
1407	337.0	67.0	1649.0	332.1	62.1	1992.7	314.9	44.9
1427	328.2	58.2	1651.0	326.0	46.0	1995.5	309.5	39.5
1428.8	338.0	68.0	1655.0	319.0	49.0	2000.0	317.2	47.2
1430.8	328.0	58.0	1697.77	324.8	54.8	2002.5	324.5	54.5
1438.3	306.5	36.5	1706.0	346.1	76.1	2007.0	313.2	33.2
1440.5	335.8	65.8	1710.0	316.2	46.2	2007.6	323.0	53.0
1444.8	323.5	53.5	1712.0	326.5	56.5	2011.4	320.6	50.6
1446.8	330.0	60.0	1732.0	317.2	47.2	2013.5	314.8	44.8
1454.8	319.0	49.0	1734.0	357.2	87.2	2015	284.8	14.8
1458.8	324.1	54.1	1859.0	316.8	46.8			
1464.5	320.5	50.5	1861.5	317.0	47.0			

表2 岩石单轴及三轴压缩与变形试验数据表

Table 2 Data from single and three axial compression and deformation tests of rocks

样号	直径 (mm)	高度 (mm)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	围压 (MPa)	轴向破坏应力 (MPa)	弹性模量 (GPa)	泊松比
<b>片麻岩</b>							
5(1)	39.5	80.3	2.889	0	46.96	33.14	0.158
6(2)	39.5	80.7	2.999	0	102.51	27.65	0.165
8(4)	39.6	80.6	2.639	0	116.74	35.32	0.199
1	39.4	80.4	2.998	5	92.21	62.56	0.291
7(3)	39.5	80.2	3.002	5	201.82	67.07	0.290
2	39.5	80.6	2.998	10	174.49	50.36	0.212
3	39.4	80.6	2.991	15	237.87	77.06	0.220
4	39.6	80.6	2.643	20	276.79	61.23	0.183
<b>角闪岩</b>							
A1-5	40.0	81.1	3.029	0	124.12	44.15	0.217
A1-6	40.0	81.1	3.013	0	114.36	36.83	0.0362
A3-8	40.0	80.9	3.007	0	150.95	46.41	0.189
A1-2	40.0	81.0	3.025	5	144.29	53.33	0.263
A1-1	40.0	81.1	3.016	10	137.37	71.08	0.184
A2-7	40.0	80.9	3.020	10	220.03	57.04	
A1-4	40.0	81.0	3.005	15	226.38	73.70	0.197
A1-3	40.0	81.0	3.003	20	263.90	69.55	0.274
<b>榴辉岩</b>							
B-6	40.0	80.6	3.413	0	178.32	128.21	0.259
B-7	40.0	80.6	3.516	0	176.42	121.81	0.246
B-8	40.0	80.4	3.243	0	94.31	135.52	0.272
B-2	40.0	81.1	3.295	5	169.23	188.12	0.447
B-1	40.0	80.6	3.315	10	241.98	115.96	0.281
B-3	40.0	81.1	3.348	15	154.29 *	103.10	0.243
B-5	40.0	81.4	3.399	15	263.78	126.42	0.408
B-4	40.0	81.4	3.507	20	312.14	157.28	

表3 最大( $S_H$ )和最小( $S_h$ )水平主应力的大小

Table 3 magnitudes of the maximum major horizontal principle stress and minimum principle stress

深度(m)	$\theta_h(^{\circ})$	$S_H$ (MPa)	$S_h$ (MPa)	深度(m)	$\theta_h(^{\circ})$	$S_H$ (MPa)	$S_h$ (MPa)
1269	45	41.4	25.3	1505	34	51.6	32.3
1430	40	48.4	30.3	1655	34	55.2	34.5
1454.8	35	47.6	29.8	1706	34	56.4	35.3
1491.8	35	50.8	31.8	1870	32	60.0	38.0
1493.8	38	48.0	30.0	1879.5	30	64.0	40.3
1495.8	35	50.8	31.8	1914.5	29	69.6	43.5
1498.3	37	49.2	30.8	1918	30	67.0	42.0
1500	38	48.0	30.0	2000	30	70.4	44.0
1502	36	50.0	31.3				

### 3.2 最大与最小水平主应力的大小

#### 3.2.1 岩石力学实验

为了获得原地岩石的强度数据参数,在主孔采集了有代表性的8个片麻岩岩石样品、8个角闪岩样品和8个榴辉岩样品作了岩石力学试验。岩石单轴实验采用了YTD-200型电子式压力试验机和30吨压力传感器;岩石三轴力学试验采用了TYS-500型岩石三轴应力试验机和100吨压力传感器,记录设备均采用了日本产7V07程序控制记录仪。三轴压缩及变形试验的试验围压分4个等级:5 MPa, 10 MPa, 15 MPa 和

20 MPa。单轴试验样本数3个,三轴试验样本数5个。样品试验在北京科技大学土木与环境工程学院岩石力学实验室完成,试验工作依照水电部颁发的“水利水电工程岩石试验规程(81)”和铁道部第一勘测设计院颁发的“工程地质试验手册(1995)”来进行。表2为岩石三轴压缩试验测试结果。

根据岩石压缩与变形的实验结果(表2)经计算,获得了片麻岩岩石内聚力为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。

### 3.2.2 估计主应力的大小

在确定了最大水平主应力方向以后,我们尝试对主应力大小进行估计。由于井孔近乎直立,其中一个主应力垂直,即垂直主应力对应于上覆岩层载荷应力。采用密度测井资料可以计算垂直主应力大小,假设上覆岩层岩石被分成密度不同的若干层,垂直主应力的计算公式为:

$$S_v = \sum \rho_i g h_i$$

其中  $\rho_i$  为第  $i$  层岩石的平均密度,  $g$  为重力加速度,  $h_i$  为第  $i$  层的厚度。

如果各层密度相同,均为  $\rho$ ,则  $H$  深度处的垂向载荷应力为:

$$S_v = \sum \rho g H$$

利用声波成像测井图象资料,测量了 1269m、1500m、2000m 等 16 个深度上钻孔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(表 3)。

根据所确定的不同深度处三个主应力的大小绘制了应力随深度变化的曲线,如图 3 所示。在 1269m 至 2000m 范围内,地应力随深度近于成线性变化,最大主应力由 1269m 的 40.4MPa 到 2000m 的 70.4MPa,最小主应力由 25.3MPa 到 44.0MPa。三个主应力的大小关系为:  $S_H > S_v > S_h$ ,表明主孔原地应力为走滑应力状态。

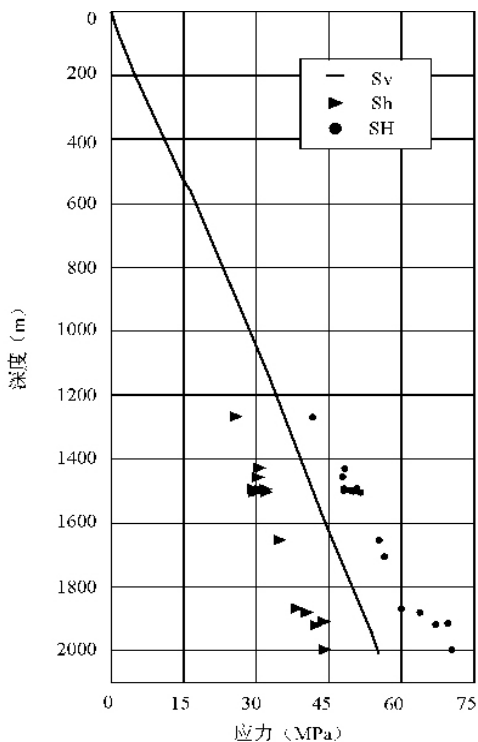


图 3 主应力大小随深度变化

Fig. 3 Stress variations versus depth in the main borehole of CCSD

## 4 讨论与结论

钻孔崩落长轴方位是最大主应力方向的可靠度量,在这方面已有许多利用钻孔崩落来限定应力场方位的成功实例 (Huber *et al.*, 1997; Zoback and Zoback, 1989; Vernik and Zoback, 1992; Hickman *et al.*, 1985; Plumb and Hickman, 1985; 俞言祥, 许忠准, 1994; 1996)。在对钻孔崩落资料选取时,注意到了钻孔加长是否是由于钻井时的机械磨蚀和泥浆冲刷等造成的。在多数情况下,机械磨蚀造成的钻孔加长与钻井方位相同。崩落是否对称出现也是确定崩落的重要条件之一,所选崩落均在井壁两侧对称出现,可以肯定,选取的崩落资料是由于应力造成的。

Zoback 和 Zoback (Zoback and Zoback, 1989) 对应力方向数据建立了数据可靠性的定量指标,分析了不同的应力指示器所指示的构造应力场的能力,所考虑的数据类型包括震源机制解、钻孔崩落、水压致裂、断裂走滑等。对于钻孔崩落数据,要达到 A 级质量,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 300m 以上,统计结果的标准偏差  $\leq 12^\circ$ 。我们统计的数量为 82 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 1216m 至 2015m,标准偏差远  $\leq 12^\circ$ ,因此我们统计的最大主应力的方向是 A 级质量,是可信的。

世界应力图项目 (Zoback, 1992) 搜集了大量包括中国东部在内的最大主应力方向数据。从世界应力图 (WSM) 项目的数据库中,抽取了山东及邻区震源机制解数据,最大水平主应力方位在 ENE-WSW 和近 EW 之间,这一地区的区域地壳应力格局以走滑为主。利用世界应力图项目中的震源机制解和钻孔崩落数据,以及发表的震源机制解和钻孔崩落数据,和大陆科学钻主孔井壁崩落确定的最大主应力方向数据一起,编制了最大主应力 ( $S_{Hmax}$ ) 方向分布图 (图 4)。

地震震源机制解也能被用来确定最大主应力的方向 (董旭光等, 1999; Bungum *et al.*, 1991)。为了进一步验证利用钻孔井壁崩落所确定的走滑应力状态是否可信,所反映的原地水平主压应力方向是否能反映区域应力状态,为此,又查阅了有关这一地区震源机制解确定应力状态的一些研究成果。周翠英等 (周翠英等, 1994) 利用 1969 年至 1991 年 6 月的地震活动资料对大陆超深钻主孔所在位置的苏鲁-南黄海广大地区的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-南西西向,研究区北部震源机制解  $P$  轴方位为  $253^\circ$ ,南部为  $70^\circ$ , $P$  轴倾角小于  $10^\circ$ 。沂沭断裂属于郯庐带,是山东主要的地震活动带,华爱军等 (华爱军等, 1997) 利用地震活动参数对沂沭断裂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 至 1984 年稳定在  $N72^\circ E$ , 1985 年后,变为  $N50^\circ E$ , 苍山 Ms5.9 地震后, 1995 至 1996 年逐渐恢复。谢智等 (谢智等, 2002) 汇编了河南及邻区 (山东、河北、安徽) 1965 年 - 2000 年共 52 次  $M_L \geq 3.5$  的地震震源机制解,表明  $P$  轴多为北东东向,地震断层主要为走滑类型。

总之,地震震源机制解、钻孔崩落资料所反映的最大水平

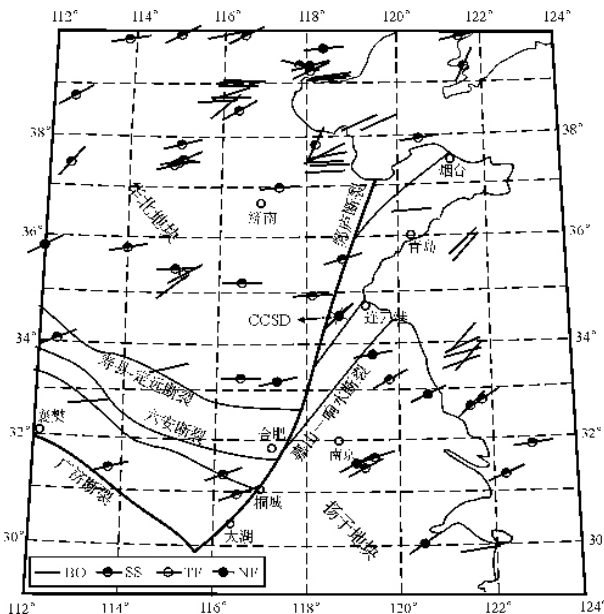


图4 中国大陆科学钻探 (CCSD) 主孔位置及钻孔崩落和震源机制解指示的应力格局示意图。

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, TF 为逆冲断裂作用, NF 正断裂作用

Fig. 4 Sketch map for the location of Chinese Continental Scientific Drill (CCSD) and Stress regime indicated by breakouts and earthquake focal mechanisms. SS represents strike-slip, TF represents thrust faulting, NF represents normal faulting.

主应力方向基本一致, 均为北东东向, 因此, 钻孔崩落资料所反映的原地水平主压应力方向是能反映区域应力状态的, 其原地主应力大小与震源机制解确定的主孔所在地区的走滑应力格局相吻合。

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、潘和平教授的大力支持和帮助, 并提供了相关资料, 同时也得到测井组的大力支持和帮助, 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、物性研究组给予了很多帮助, 在此也表示诚挚的感谢。

## References

Barton C A, Zoback M D, Burns K L. 1988. In-situ stress orientation and magnitude at the Fenton geothermal site, New Mexico, determined from wellbore breakouts. *Geophysical Research Letters*, 15(5): 467-470

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

Bungum H, Alsaker A, Kvamme L B, Hansen R A. 1991. Seismicity and seismotectonics of Norway and nearby continental shelf areas. *Journal of Geophysical Research*, 96(B2): 2249-2265

Dong X G, Zhou C Y, Li H, Zheng J C. 1999. Study on tectonic stress field and the seismicity in Shandong area. *Earthquake research in Plateau*, 11(3): 37-43 (in Chinese with English abstract)

Gough D I, Bell J S. 1982. Stress orientations from oil-well fractures with examples from Colorado, east Texas, and northern Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 19(7): 1358-1370

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(B7): 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, Roth F, Khakaev B, Van-Kin L, Pevzner L, Moos D, Zoback M D, Schmitt D. 1997. Analysis of borehole televiewer measurements in the Vorotilov drillhole, Russia - first results. *Tectonophysics*, 275(1-3): 261-272

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 breakouts in the Cajon Pass scientific research borehole. *Journal of Geophysical Research*, 97(B4): 5109-5119

Xie Z, Liu Y X, Hu W J, Xie J J, Ma J L, Zhao H. 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 no English abstract)

Zhou C Y, Jiang Z F, Wang H W, Dong X G, Ma Y X, Fang Y L. 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 D, Moos D, Mastin L, Anderson R N. 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: Paiser L C, Mooney W D, (eds.). *Geophysical Framework of the Continental United States: Boulder, Colorado*, Geological Society of America Memoir, 172: 523-539

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

## 附中文参考文献

俞言祥, 许忠淮. 1994. 用钻孔崩落法研究冀中坳陷水平主应力方向. *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坳陷上地壳应力状态. *地震学报*, 18(2): 246-253

周翠英, 姜早峰, 王红卫, 董旭光, 马玉香, 房玉兰. 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

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 5.2 级地震. *地震学刊*, (3): 18-23

谢智, 刘尧兴, 胡卫健, 谢健健, 马俊林, 林晖. 2002. 河南及邻区地震的震源机制. *西北地震学报*, 24(3): 283-286

董旭光, 周翠英, 李红, 郝建常. 1999. 山东地区现今构造应力场与地震活动. *高原地震*, 11(3): 37-43