

利用钻孔崩落研究中原油田 的构造应力场^{*}

黄雨蕊¹⁾ 许忠淮¹⁾ 高阿甲¹⁾ 谭廷栋²⁾

1) 中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100083 石油勘探开发科学研究院

摘 要

利用计算机程序分析处理了中原油田 36 口井的斯伦贝谢地层倾角测井仪所测的双井径及相应的测臂方位曲线, 根据孔壁优势崩落方向推断出中原油田所在的东濮凹陷内构造应力场的主应力方向。研究发现, 最大水平主压应力方向在凹陷北部为 N(79°±6°)W, 而在南部为 N(79°±8°)E, 二者相差 22°左右。利用线弹性平面应力有限单元模型模拟本地区应力场的结果说明, 凹陷区较软的介质和北窄南宽的几何形状可能是引起凹陷北部最大水平主压应力方向相对于周围构造主应力方向产生一顺时针角度偏转的原因。根据某井孔出现明显径向不对称孔壁崩落的起始深度估计了最大和最小水平主压应力大小的取值范围, 展示了反映应力状态随地点和深度而变化的证据。

关键词 中原油田; 钻孔崩落; 应力场

1 引 言

中原油田所在的东濮凹陷是以下第三系地层为主的内陆断陷盐湖盆地, 其东缘为兰聊断层, 西缘为滑县—长垣断层, 总体呈北北东-南南西向延伸, 北窄南宽, 见图 1(黄俊明, 1991)。丁健民等(1987)根据 29 个井孔的孔壁优势崩落方向确定出该盆地的濮阳地区最大水平主压应力方向为 N(105°±10°)E, 即 N(75°±10°)W, 并指出周围地区的构造应力场最大主压应力方向为 N85°E, 因而濮阳地区的最大水平主压应力方向与周围地区相差了 20°。关于产生这一差异的原因, 该文尚未深究, 曾设想可能与菲律宾板块向北西方向驱动有关。后来, 丁健民等(1990)又基于更丰富的钻孔崩落资料研究过中原油田的地应力场, 指出在凹陷内部不同的断块之间可能存在更局部的主应力方向的偏转, 但也提及“总的说来, 中原油田的区域应力方向与我国华北广大地区的应力方向是一致的”(丁健民等, 1990)。中原油田所在的东濮凹陷地区的构造主应力方向与周围区域构造应力场的主

* 地震科学联合基金资助项目。国家地震局地球物理研究所论著 93A0057。

1992 年 10 月 10 日收到初稿, 1993 年 5 月 13 日决定采用。

应力方向究竟是否一致?若有变化,引起变化的原因是什么?这是值得深入探讨的问题.

本文利用中原油田 36 口井孔的孔壁崩落资料,在用计算机对资料进行细致分析的基础上,提供统计性的更为直观的证据,分析东濮凹陷地区构造应力场的特征及可能的方向变化,并探讨产生方向变化的原因.此外,本文还将讨论钻孔崩落资料对地下应力状态所提供的可能约束及应力场空间分布的不均匀性.

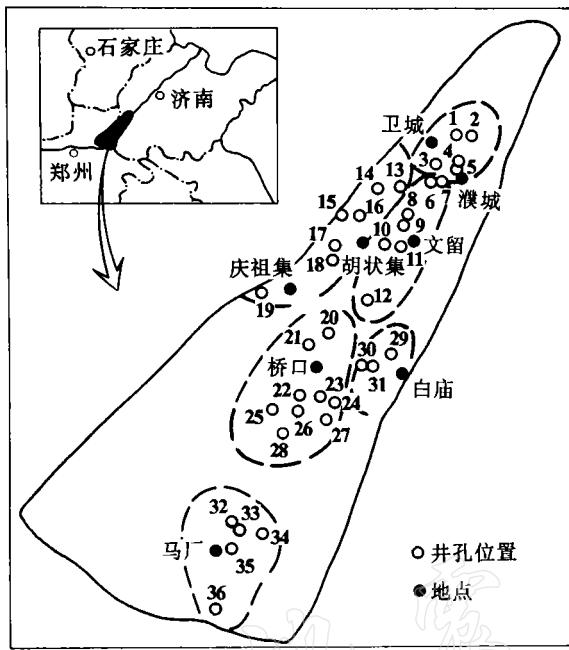


图 1 本文分析的井孔在东濮凹陷内的位置.数字为井孔编号(见表 1)

2 资料处理

选用中原油田 36 口井的斯仑贝谢地层倾角测井曲线,用计算机对其中的两条井径曲线 C_1 和 C_2 及测量极板的方位曲线进行了采样和插值处理(高阿甲等, 1990). C_1 和 C_2 分别为测井仪的 1—3 测臂和 2—4 测臂所测井径大小, C_1 和 C_2 所代表的两个井径方向互相垂直.

所用井孔位置见图 1, 测井段范围见表 1. 本文资料主要反映了 2000—4000 m 深度处的应力状态,而最深的信息是来自 5030 m(19 号孔,见表 1).

为反映孔壁崩落后的实际孔形,利用采样得到的孔径及相应方位数据绘制了统计性的孔形平面投影图.图 2 中给出的全是 $|C_1 - C_2|$ 投影图,即将二测量孔径 C_1 和 C_2 中的一个当大圆直径.在圆外点出长孔径与短孔径的差值,这是为了突出孔壁崩落的方向差异.各圆中间的玫瑰图统计的是孔径长的测臂所停留的方位.图 3c 中绘的是 16 号孔的 C_1 和 C_2 两个孔径的实际测值.此外,还绘制了长孔径方位及长孔径大小随深度的变化图,见图 3a 和 3b.

表 1 各井孔的测井段及优势崩落方向

| 井孔编号 | 井孔名 | 测井段范围, m | 测井段长度, m | 优势崩落方向* |
|------|---------|-----------|----------|---------|
| 1 | 濮 114 | 2425—3525 | 1100 | (N10°W) |
| 2 | 濮 115 | 2360—3350 | 990 | N15°E |
| 3 | 濮深 3 | 3500—4050 | 550 | N15°E |
| 4 | 卫 42 | 2000—3800 | 1800 | (N20°E) |
| 5 | 濮 3-138 | 2600—2935 | 335 | (N10°E) |
| 6 | 文 90 | 2820—3595 | 775 | (N35°E) |
| 7 | 文 51 | 2510—3040 | 530 | N15°E |
| 8 | 文 152 | 2400—3300 | 900 | N15°E |

续表 1

| 井孔编号 | 井孔名 | 测井段范围, m | 测井段长度, m | 优势崩落方向* |
|------|--------|-----------|----------|-----------|
| 9 | 文 7219 | 2200—3635 | 1435 | N5°E |
| 10 | 文 248 | 2700—3400 | 700 | (E-W) |
| 11 | 文 1376 | 2900—3740 | 840 | (N70°W) |
| 12 | 文 143 | 2500—3050 | 550 | N10°E |
| 13 | 胡 30A | 1475—2125 | 650 | N20°E |
| | 胡 30B | 2250—2500 | 250 | N20°E |
| 14 | 胡 16 | 1640—2090 | 450 | (N40°E) |
| 15 | 胡 13 | 1490—2625 | 1135 | (N85°E) |
| 16 | 胡 57 | 200—3500 | 3200 | N5°E |
| 17 | 胡 7 | 1645—2650 | 1005 | (N10°E) |
| 18 | 开 38 | 2425—3000 | 575 | N10°E |
| 19 | 庆古 1 | 4425—5030 | 605 | N5°E |
| 20 | 刘 1A | 3775—4045 | 275 | N5°E |
| | 刘 1B | 4175—4500 | 325 | N5°E |
| 21 | 桥 22 | 2975—3990 | 1015 | (N20°E) |
| 22 | 桥 27 | 2200—3200 | 1000 | (N5°E) |
| 23 | 桥 31 | 3500—4100 | 600 | N10°W |
| 24 | 桥 16 | 2780—4000 | 1220 | N5° E |
| 25 | 桥 33 | 3600—4490 | 890 | N20°W |
| 26 | 桥 34 | 3500—4500 | 1000 | (N5°W) |
| 27 | 桥 25 | 3635—4775 | 1140 | ? |
| 28 | 桥 24 | 3730—4710 | 980 | (N35°W) |
| 29 | 白 14 | 2950—3790 | 840 | N15°W |
| 30 | 白 18 | 2805—3690 | 885 | N5°W |
| 31 | 白 23 | 3200—4245 | 1045 | N5°W |
| 32 | 马古 5 | 3360—4000 | 640 | N15°W |
| 33 | 马 17 | 2850—3990 | 1140 | N15°W |
| 34 | 马 24 | 2500—3780 | 1280 | N15°W |
| 35 | 马古 6 | 3150—3940 | 790 | N5° W |
| 36 | 春古 3 | 2930—3200 | 270 | ? |

* 带括号方向表示优势崩落方向欠可靠, ? 表示无优势崩落方向.

3 普遍存在水平差应力的证据

参考地质构造(黄俊明, 1991), 按井孔所在地区将 36 口井分为濮城、文留、胡状集—庆古、桥口、白庙、马古共 6 个分区(图 1). 在图 2 中按各个分区给出了 $|C_1 - C_2|$ 的平面投影图. 在此图中对每个分区都注意了将显示明显优势崩落方位的井孔排在前面, 用实短划标出优势崩落方位, 虚短划所标方位显示优势崩落的程度差些.

对于一部分井孔, 并不是整个测井段优势崩落方向都很稳定, 常常是上段崩落方向变化大, 下段崩落方向就比较稳定了. 在图 3a 和 b 中绘出了这部分井孔崩落方向随深度的变化图. 在这些图中只点出了当长臂与短臂的孔径差 $C_1 - C_2$ 大于十分之一钻头直径时, 即长臂所在方位随深度的变化. 方位变化图中空白段说明在这些深度上二垂直方向的测径相差不大. 图中粗箭头指示出该深度以下, 优势崩落方向变得稳定了. 对图 3a, b 中所

示井孔, 图 2 中相应的孔形图只是粗箭头所标深度以下孔段的平面投影图。16 号孔是测井段最长的孔, 总长度达 3300 m。图 3c 给出该孔上、中、下 3 个孔段的实测孔径 C_1 和 C_2 的平面投影图。由图 3c 可见, 1900 m 以上基本看不出优势崩落方向, 所以, 崩落方位随深度变化也大, 从 1900—2200 m 的中段显示出 NE 方向的优势崩落, 但三角形崩落缺口形态不明显; 而 2200 m 以下则显示出基本稳定的近 N-S 向的优势崩落方向, 且崩落缺口明显。图 3b 所示的 21 和 22 号孔有些不同的特点: 箭头上、下各显示出不同的优势崩落方向。而在图 24 中判定构造应力方向时只取用了深部所示的优势方向。

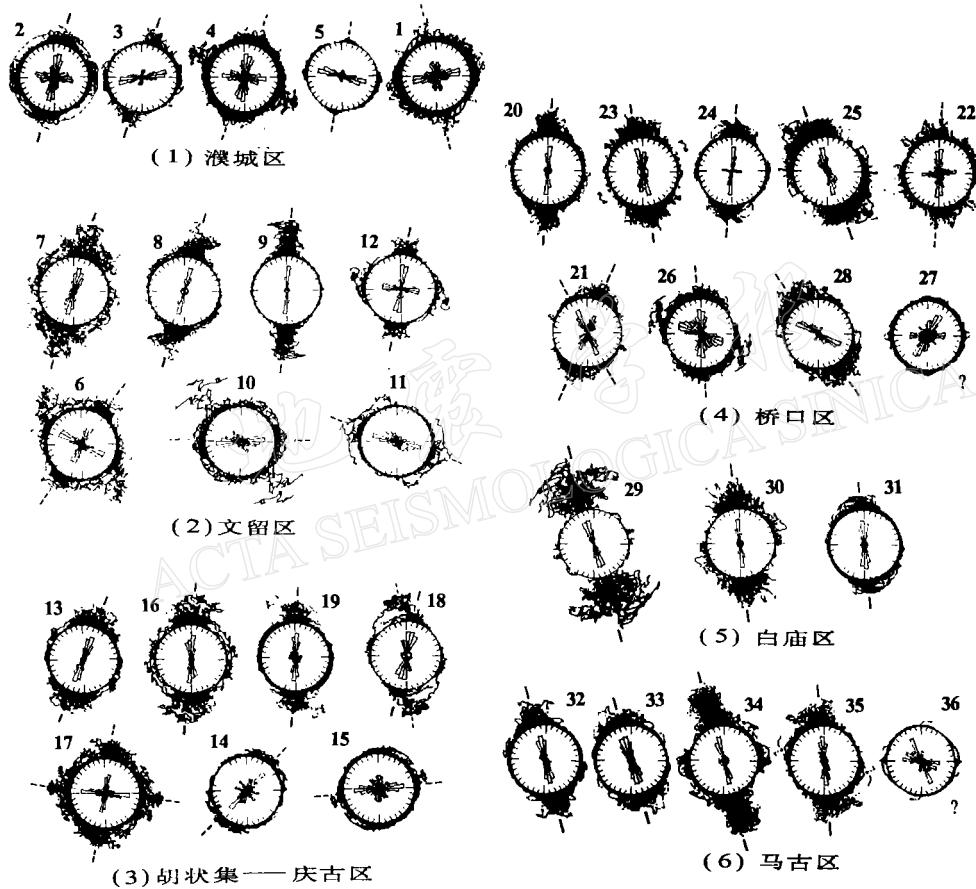


图 2 各井孔 $|C_1 - C_2|$ 值的平面投影图。以圆圈直径代表二测量孔径 C_1 和 C_2 中的一个, 在圆外点出了差值 $|C_1 - C_2|$ 。圆中间的玫瑰瓣统计的是长孔径测臂停留的方位。小短划标出优势崩落方位, 虚短划表示判断的优势方位欠可靠

由图 2 可看出, 多数井孔在崩落较大的方位都表现出三角形缺口的崩落形态。一般情况下, 图中玫瑰瓣所示的长臂停留最多的方位与缺口的方向一致, 有时二者也不一致, 如濮城区的 3 号孔(图 2(1)), 桥口区的 28 号孔(图 2(4))等, 此时在判定优势崩落方位时将侧重选择统计性的崩落缺口的方向。

根据实验结果(Haimson and Herrick, 1985), 出现三角形崩落缺口是二水平主应力存

在明显差异的表现，这说明东濮凹陷地区普遍存在着明显的水平差应力(或水平剪切应力)。图3a和c中16号孔的资料说明，该孔所在地点的浅层(1900 m以上)差应力并不明显，而2200 m以下水平差应力作用就显著了。若假定优势崩落方位稳定的深度表示构造差应力作用明显的深度，则由图3a可见，这种深度是因孔而异的，也就是因地而异的。

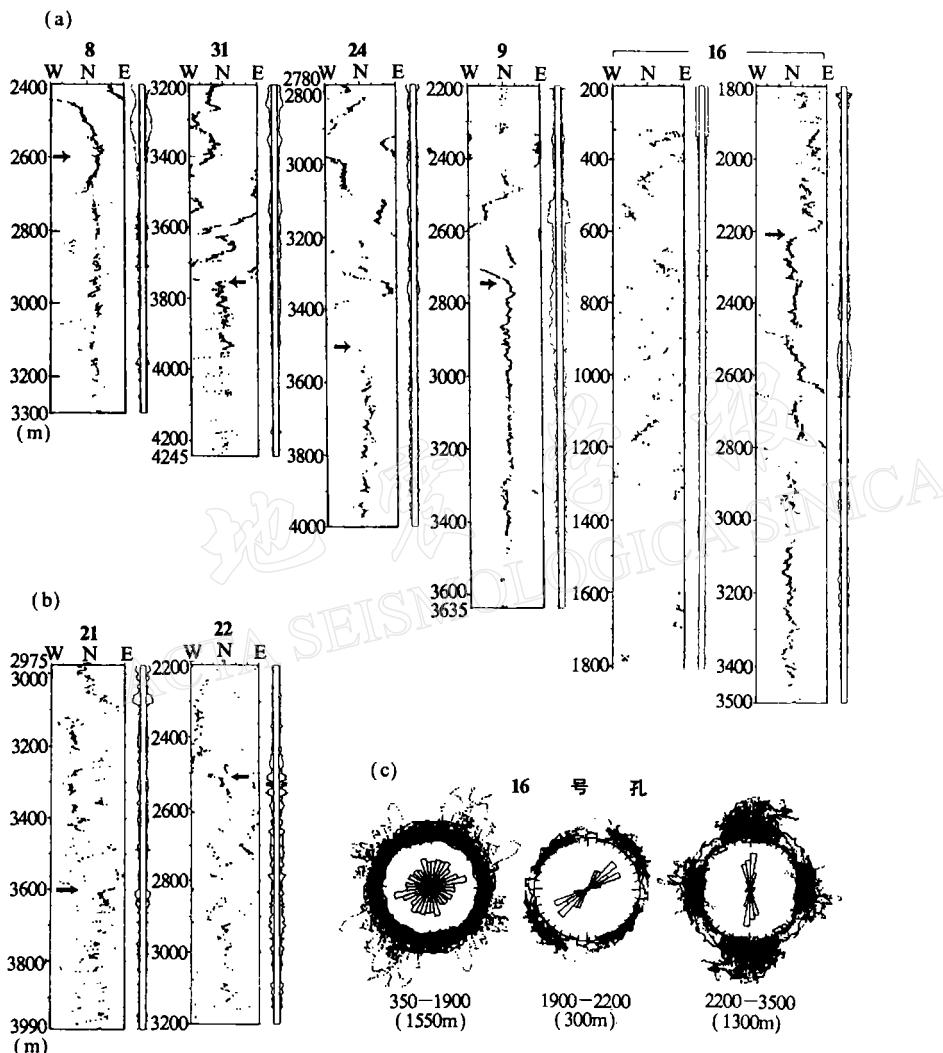


图3 (a)和(b)为长测臂方位随深度的变化图,图上方数字为孔的编号(表1),图中只点出了当 $|C_1 - C_2| > 2.2$ cm(钻头直径的十分之一)时长臂的方位,方位图中粗箭头指示崩落方位从不稳定变为稳定的转变深度.方位图右侧绘出所测长孔径随深度的变化概况; (c)为16号孔的 C_1 和 C_2 实测值的平面投影图

4 南北部水平主应力方向的差异

根据图2和图3资料判别出的各井孔的优势崩落方向统一标在图4a上，并列于表1。

图 4a 中的虚线段与表 1 中带括号的数字对应, 它们或者表示优势崩落方位欠可靠, 或者表示该井孔处可能存在明显的局部应力场变化。由图 2 的资料和表 1、图 4a 的结果可明显看出, 东濮凹陷的北区和南区(图 4a 中用虚线分开)井孔的优势崩落方向发生了变化。北区以北偏东为主, 南区则以北偏西为主。用表 1 所示的可靠优势崩落方向数据可求出北区的平均优势崩落方向为 N($11^{\circ} \pm 6^{\circ}$)E, 而南区的平均优势崩落方向为 N($11^{\circ} \pm 8^{\circ}$)W。由于崩落方向指示了最小水平主应力方向(Bell and Gough, 1979), 由此推断出北区最大水平主压应力方向为 N 79° W, 而南区为 N 79° E。

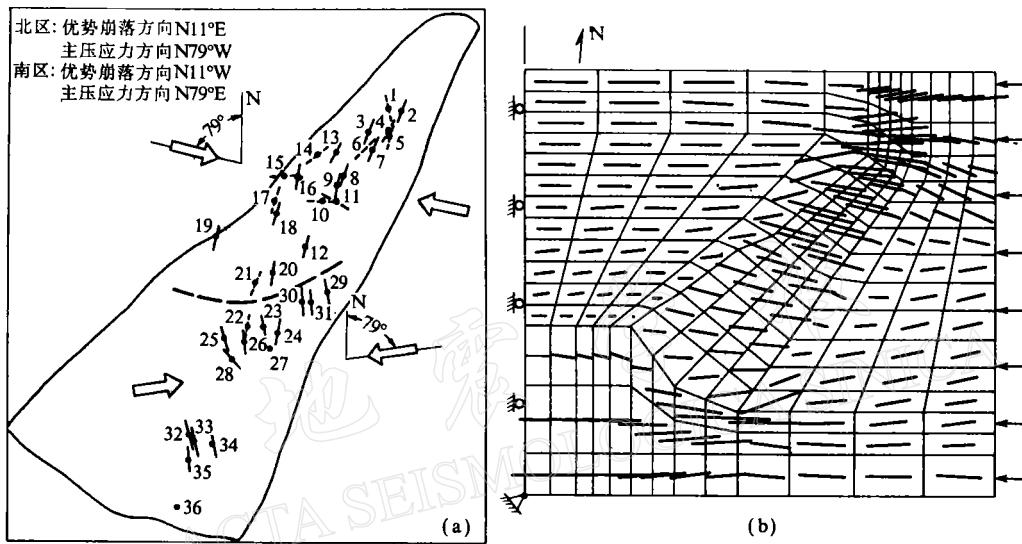


图 4 (a)东濮凹陷井孔孔壁优势崩落方向图. 数字为孔号, 短划方向表示优势崩落方向, 虚短划表示可靠度低, 空心粗箭头表示推断的最大水平主压应力方向;(b)二维线弹性有限单元模型模拟的主压应力方向分布图. 中间黑线所围区域模拟较软的凹陷区

本文所得北区最大水平主压应力方向与丁健民等(1987)所给出的结果是相近的, 但实际证据(图 2、图 3)说明, 南区的最大水平主应力方向与北区的有差异。按照地震资料所推断的构造应力场结果(许忠淮等, 1983), 东濮凹陷周围地区的最大主压应力方向为水平的 N($80-85^{\circ}$)E 之间, 凹陷南部的水平主应力方向与区域构造应力场的方向是接近的。为什么凹陷北部的主应力方向相对于区域构造应力方向发生了一个小的偏转呢? 考虑到凹陷内部是第三系砂泥岩沉积为主, 且断裂发育, 特别是北区多含盐地层(实际是盐层与多种岩层的交互沉积), 这种地层容易发生塑性流动, 且这种流动在地质构造形成过程中就开始了(黄俊明, 1991), 因而相对于周围地区, 东濮凹陷可能是地壳上层介质松软的地区。凹陷内部应力场的局部变化可能是由凹陷的介质特性和几何形态引起的。

为探讨东濮凹陷引起构造应力场变化的可能性, 我们做了一个简化的二维线弹性有限元模拟试验, 结果见图 4b。图中间黑线所围的网格部分表示东濮凹陷, 区内与区外的杨氏模量比为 1 : 4, 区外泊松比为 0.25, 区内的取 0.35。用右侧边界的均匀加压模拟外围构造应力的作用。图 4b 所示主压应力方向的计算结果说明, 软的凹陷区的存在会引起

主压应力方向产生一个顺时针方向的偏转,而且这一偏转主要发生在凹陷区的北部,南部基本无方向偏转可能与凹陷北窄南宽的特定形状有关。由于模型简单,与实际情况作完全定量和更细致的比较是不切实际的。但此模型告诉我们,相对软弱的东濮凹陷是可能引起北部地区水平主应力方向的局部偏转的。

5 估计水平应力大小

假定有一个主应力轴与地表垂直,则竖直井孔孔壁的不对称崩落是在一定的水平差应力作用下才能发生的。根据井孔出现不对称孔壁崩落的深度,可以估计该深度处所受到的最大水平主压应力 S_h 和最小水平主压应力 S_b 的大小。以测井段最长的 16 号孔为例,由图 3 可见,可选定 2200 m 作为明显出现差异崩落的深度,现估计此深度处的 S_h 和 S_b 大小。

孔壁在最小水平主应力 S_b 方向发生压缩破坏的条件是(Moos and Zoback, 1990)

$$3(S_h - P_0) - (S_b - P_0) \geq C$$

式中, P_0 为孔隙流体压力, C 为孔壁岩石的抗压强度。上式即

$$S_h \geq \frac{1}{3}(S_b + C + 2P_0) \quad (1)$$

采用 Moos 和 Zoback (1990) 所用的估计有

$$C_0 \leq C \leq 1.36C_0$$

C_0 为岩石的单轴压缩强度。此外,要使岩体不沿预存断层面发生滑动而保持稳定,还应有以下的应力极限条件(Jaeger and Cook, 1979)

$$\frac{S_1 - P_0}{S_3 - P_0} = (\sqrt{1 + \mu^2} + \mu)^2 \quad (2)$$

式中, S_1 和 S_3 分别为最大和最小主压应力, μ 为沿预存薄弱面滑动时的摩擦系数。由于本区的区域构造应力状态属走滑断层型应力系统,即中等主应力轴直立,最大和最小主压应力水平(许忠淮等, 1983; 陈家庚等, 1982),因此,就可取

$$S_1 = S_h \quad S_3 = S_b \quad (3)$$

仿照 Moos 和 Zoback (1990),可用图 5 所示的应力状态图表示在钻孔一定深度处可能存在的应力状态。假定垂直主应力 S_v 近似由上覆岩层的重力决定,则图 5 中 C 点表示以下的特定应力状态:

$$S_h = S_b = S_v = \rho_r gh \quad (4)$$

式中, ρ_r 上覆岩层的平均密度。按丁健民等(1990)的估计,取 $\rho_r = 2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, h 是所研究的深度,取值 2200 m。考虑到不少砂泥岩交互地层的特性(黄俊明, 1991),取 $C_0 = 100 \text{ MPa}$,可能并不低估岩石的平均压缩强度。为确定起见,我们取 $C = 1.36C_0$,若考虑预存断层面的摩擦强度并不太高的情况,我们取 $\mu = 0.6$ 。对孔隙流体压力取常用的估计值,即等于同样深度水柱压强。取定以上具体数值后,由(1)式可得图 5 中的直线 DE ,该直线上方为可产生孔壁不对称崩落区。由(2)式和(3)式可得图 7 的直线 AB 。实际上,三角形 ABC 所确定的区域表示走滑断层运动地区所可能容许的应力状态。这样,由断层的稳定性和产生孔壁崩落条件就将 16 号孔在 2200 m 深度处的应力状态限制在图中带点的三角

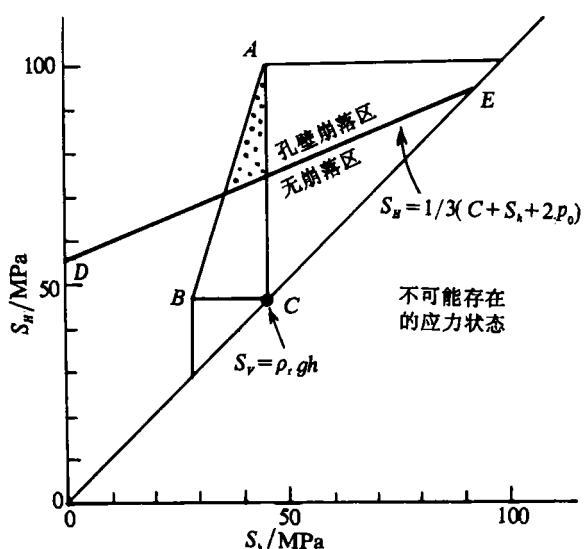


图 5 16号孔 2200 m 深度处由出现孔壁不对称崩落估计的应力状态图。带点区域为假定平均岩石单轴压缩强度为 100 MPa、断层面摩擦系数为 0.6 时可能存在的应力状态区

形区域内了,且可算出该深度处 S_H 和 S_h 所可能取值的范围为: S_H 是 72—102 MPa; S_h 是 38—47 MPa; 水平剪应力是 17—28 MPa.

岩石强度降低将使图 5 中 DE 线下移, S_H 和 S_h 的下限值降低,而孔隙流体压力升高将使 DE 线上移, S_H 和 S_h 的下限值升高. 断层面的摩擦系数升高将提高 S_h 上限值,而 S_h 的上限值为上覆岩层的压强. 对岩石原地强度缺乏了解可能是估计值不准的主要原因.

6 应力场的不均匀性

井孔孔壁崩落的优势方向和统一性的特征反映了区域性构造应力场的作用,而对优势方向和统一特征的偏离则反映了局部应力场的变

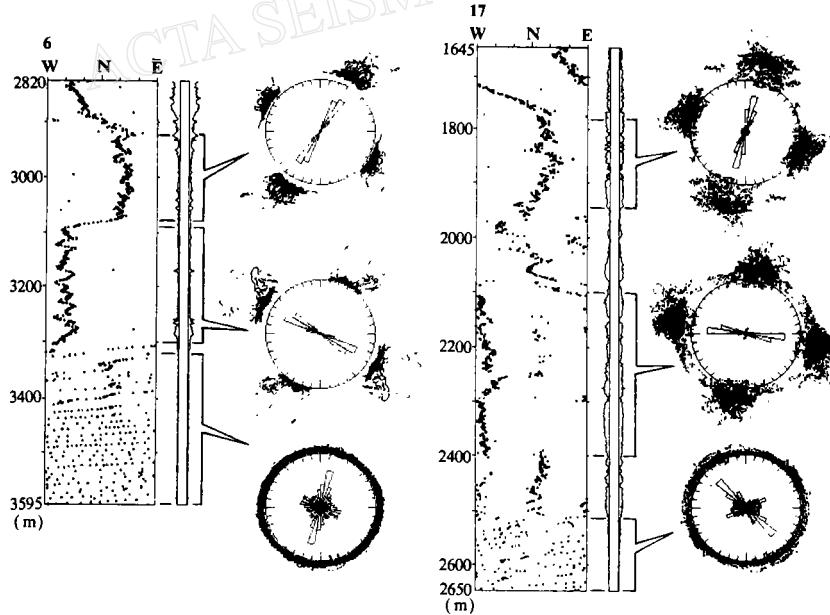


图 6 6号和 17号孔不同井段孔壁崩落的变化. 每个孔的左图显示长臂方位和测径大小随深度的变化,右图为所标井段的 C_1 和 C_2 测径值的平面投影图

化,包括不同地点的变化和不同深度的变化.

从中原油田井孔崩落的资料确实可看出东濮凹陷地区应力场随地点的变化.由图2和图4a可见,6,10,11,14和15等孔或者优势崩落方向与周围井孔不一样,或者崩落方向多变化.此外,有些井孔二垂直方向差异崩落的大小相差也很大,例如,9号孔与15号孔的测井段都达到千米以上(表1),9号孔南北方向的孔径几乎比东西方向扩大一倍,实际孔形是很偏的,而15号孔绝大部分测井段的差异崩落都是不明显的,说明大部分孔形接近圆形(图2(2)).这反映了9号孔和15号孔所在地点应力状态的差异.

局部应力场随深度的变化主要表现为不同地层间应力方向和大小的变化.图3c已给出了16号孔不同深度段崩落状况的变化.图6给出这种变化的另两个例子,即6号孔和9号孔的分层崩落情况.图中的孔形图画的是 C_1 和 C_2 的测值图,两个孔所标出的上段都是NE方向孔径大,而所标的中段都是NWW或近E-W方向孔径大.两个孔的下段都看不出不同方向的差异崩落.前文提到图3a和b中所示的一些孔,测井段上部崩落方向多变化,而下部优势崩落方向比较稳定,这说明上段不同地层间主应力方向是多变的.

地应力场对岩层裂缝的发育程度和优势延伸方向有控制作用,因而也直接影响着地下油气和水的运移特征,了解地下应力状态的空间不均匀性对合理部署油气开发有重要意义.

本文利用了汪素云调制的有限元程序,笔者在此表示感谢.

参 考 文 献

- 陈家庚、曹新玲、李自强, 1982. 水力压裂法测定华北地下深部应力. 地震学报, 4, 350—361.
- 丁健民、梁国平、高建理、郭启良、景朝晖、曹守川、邱绍安, 1990. 中原油田深井应力测量结果及其在油田勘探开发中的应用. 地壳构造与地壳应力文集, 4: 111—125.
- 丁健民、梁国平、郭启良、高建理、曹守月、贾振先、景朝晖、杨继林, 1987. 根据钻孔崩落椭圆确定地壳应力方向. 地震学报, 9, 143—153.
- 高阿甲、许忠淮、陈家庚, 1990. 用钻孔崩落推断四川盆地的水平主应力方向. 地震学报, 12, 140—147.
- 黄俊明, 1991. 中原油田盐层的蠕变特性及其对套管的影响. 油田开发工程与地震减灾(张德元, 王优龙主编), 255—263. 石油工业出版社, 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.
- Bell, J. S. and Gough, D. I., 1979. Northeast-Southwest compressive stress in Alberta: evidence from oil wells. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 45, 475—482.
- Haimson, B. C. and Herrick, C. G., 1985. *In situ* stress evaluation from borehole breakouts experimental studies. In *Proceedings of the 26th US Symposium on Rock Mechanics*, 1207—1218. Rapid City, South Dakota, 26—28, June 1985.
- Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W., 1979. *Fundamentals of Rock Mechanics*, 3rd ed., 593pp. Chapman and Hall, New York.
- Moos, D. and Zoback, M. D., 1990. Utilization of observation of well bore failure to constrain the orientation and magnitude of crustal stresses: Application to continental, deep sea drilling project, and ocean drilling program boreholes. *J. Geophys. Res.*, 95, B6, 9305—9325.