

# 地层倾角测井在油田开发中的新应用

张 华 曲国胜

(国家地震局地质研究所, 北京 100029)

严成信

(大港石油管理局测井公司, 天津 300280)

根据地层倾角测井可知崩落椭圆井眼长轴方向, 进而确定现代构造应力场最大水平主应力方向, 可用于: (1) 研究油田区局部应力场和区域应力场的关系; (2) 预测人工压裂缝的延伸方向; (3) 指导合理地布置油水井网。

关键词 地层倾角测井 应力场方向 人工压裂缝 井网布置 大港油田

第一作者简介 张 华 男 27岁 助理研究员 构造地质

根据井壁崩落椭圆的长轴取向, 确定地壳现代构造应力场方向的方法称为井壁崩落椭圆法<sup>[1-4]</sup>, 是近年来发展起来的研究深部地壳现代构造应力方向行之有效的方法。我国从1984年开始进行这方面的工作, 测定了一些油田区的现代构造应力方向。本文以渤海湾盆地的油田为例, 讨论地层倾角测井在油田开发中的应用。

## 一、基本原理

### (一) 力学机制

自从贝尔(Bell)和高夫(Gough)提出井壁崩落椭圆是由于井壁产生应力集中发生剪切破裂所致, 这种解释便为人们所接受。

在双轴应力作用下, 孔壁应力分布状态是(图1)<sup>[1]</sup>:

$$\sigma_r = \sigma_{\theta} = 0$$

$$\sigma_{\phi} = \sigma_1 + \sigma_2 - 2(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta$$

式中  $\sigma_r$ 、 $\sigma_{\theta}$ 、 $\sigma_{\phi}$  分别表示径向、切向、剪切应力。

由上式可见, 当  $\theta = \pi/2$  或  $3\pi/2$  时, 即在与最小应力  $\sigma_2$  平行的钻孔直径的两个端点 (M 和 N), 切向应力  $\sigma_{\phi}$  达到最大值 ( $\sigma_{\phi} = 3\sigma_1 - \sigma_2$ ); 而当  $\theta = 0$  或  $\pi$  时, 即在与最大主应力  $\sigma_1$  相平行孔径的两个端点 (P 和 Q), 切向应力达到最小值 ( $\sigma_{\phi} = 3\sigma_2 - \sigma_1$ )。因此, 只要地壳内存在水平差应力, 井壁就会形成应力集中并产生井壁崩落椭圆。然而, 引起井壁崩落椭圆的因素很多, 如溶蚀崩落、冲刷崩落、裂缝崩落都可以产生井眼变形。此外, 在钻探过程中的严重孔

收稿日期: 1992-09-26 改回日期: 1993-01-15

\* 本文由中国石油天然气总公司“改善枣园油田开发效果科技攻关”项目资助。

斜现象也可以造成椭圆孔眼，在形态上与崩落椭圆孔段非常相似，这就需要根据井斜角随深度的变化曲线进行分析。实践证明，凡井斜角小于 $5^\circ$ 以下的，均不会造成明显的椭圆孔眼井段。

## (二) 井壁崩落椭圆的识别标志

为了识别由构造应力造成的崩落椭圆，我们提出以下几种标志(图2)：

(1) 井壁崩落椭圆往往成段崩落，在四臂地层倾角井径测井记录图上表现为：一条井径曲线与另一条井径曲线有明显的差异，即具有明显的井径差。

(2) 井壁崩落椭圆段具有一定的长度，在该段上长轴取向基本一致。在同一个钻孔的不同深度上，这种崩落孔段有时较短，为几米或几十米，有时相当长，达几十米，甚至上百米。

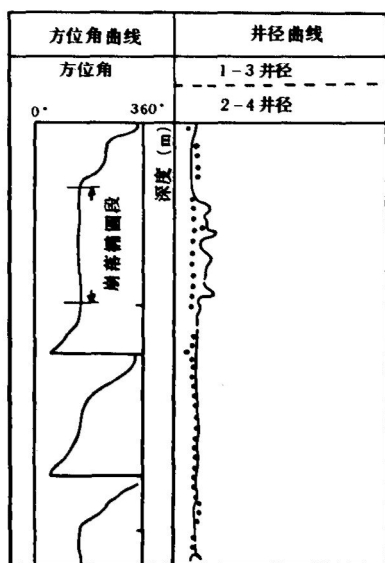


图2 井壁崩落椭圆段识别示意图

水平主应力方向的测量步骤是：(1) 搞清测井记录曲线的格式及各条曲线所代表的内容；(2) 根据识别井壁崩落椭圆段的标志，划出不同深度的崩落椭圆段；(3) 对所得的崩落椭圆长轴方位角进行优势方位统计，找出其最大优势方位，即得到测量孔段崩落椭圆长轴的优势方向，而最大水平主应力方向垂直该优势方向，由此得出最大水平主应力方向。下面举一实例来说明。

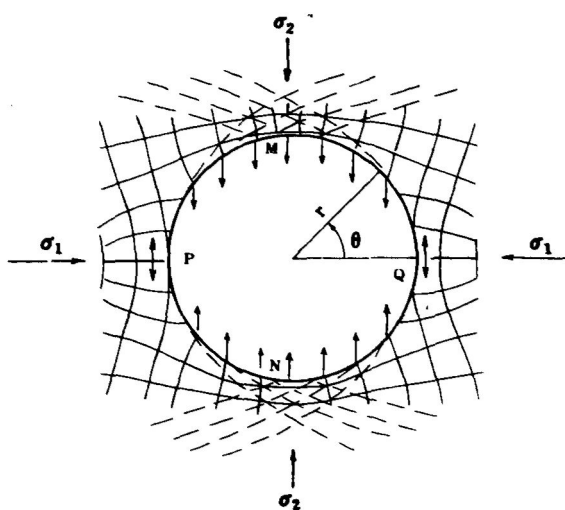


图1 双轴应力作用下孔壁应力轨迹图

(3) 椭圆孔段的顶、底面曲线方位有所变化，变化范围从 $0^\circ$ 至 $360^\circ$ ，表现为顶、底面作旋转运动。

## (三) 测量方法

地层倾角井径测井仪除直接测量两条相互正交的井径(即 $C_{1,3}$ 和 $C_{2,4}$ )曲线外，由于该仪器装有一套相应的磁定向装置，还同时记录有 $C_{1,3}$ 极板的相对方位角(RB)，井斜方位角(AZIM)以及井斜角(DEVI)，它们与 $C_{1,3}$ 极板方位角(PIAZ)的关系为<sup>[5]</sup>：

$$PIAZ \approx AZIM + RB$$

(此式在 $\cos DEVI \approx 1$ ，即井斜角较小时成立)

如果 $C_{1,3}$ 井径曲线表现为长轴井径时，则崩落椭圆长轴方位角( $\beta$ )就等于PIAZ，即： $\beta = PIAZ$ ；当 $C_{2,4}$ 井径曲线表现为长轴井径时，其长轴方位角( $\beta$ )则为： $\beta = AZIM + RB \pm 90^\circ$ 。在有些测井记录中，有时直接记录 $C_{1,3}$ 极板方位角(PIAZ)，这时，我们可以直接从图上读取其长轴方位角。

因此，利用地层倾角测井确定现代构造应力场最大

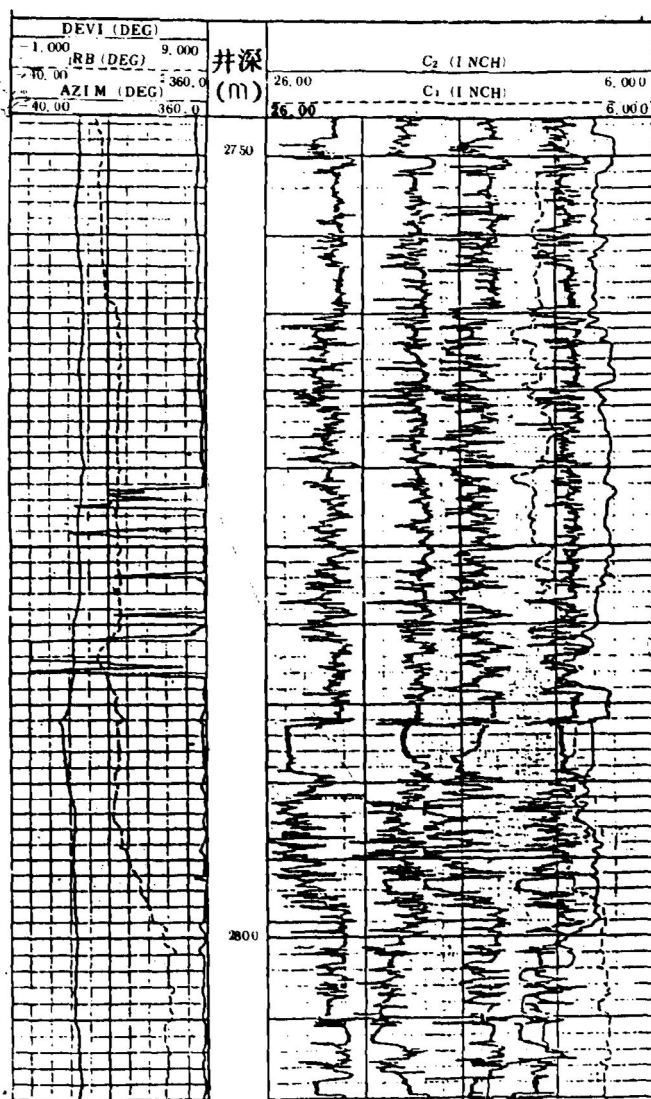


图3 高6井四臂地层倾角测井记录曲线

图3是大港油田北部地区高6井中的一段四臂地层倾角并径测量记录曲线,依照上述步骤分析了该测井段。图中钻孔的井斜角(DEVI)均小于 $3^{\circ}$ ,两条并径曲线有明显的差别,可确定出两个明显的崩落椭圆孔段。在2760—2785m崩落椭圆孔段, $C_{1-3}$ 对应的并径是长轴并径,故崩落椭圆长轴方向按 $AZIM+RB$ 计算。在2800—2810m段, $C_{2-4}$ 对应的并径是长轴并径,故崩落椭圆长轴方向按 $AZIM+RB\pm 90^{\circ}$ 计算,其结果见表1。对其进行崩落椭圆长轴优势方位的计算,经过换算,即可得到该井段地层倾角测量现代构造应力场方向(表2)。

表1 高6井2760—2810m段崩落椭圆参数选取和计算结果

| 井深<br>(m) | 方位角  |      | 崩落椭圆长轴方向 |
|-----------|------|------|----------|
|           | RB   | AZIM |          |
| 2760      | 180° | 342° | 162°     |
| 2765      | 180° | 346° | 166°     |
| 2770      | 186° | 358° | 186°     |
| 2775      | 180° | 356° | 176°     |
| 2780      | 182° | 358° | 180°     |
| 2785      | 176° | 348° | 174°     |
| 2800      | 268° | 355° | 353°     |
| 2805      | 288° | 348° | 6°       |
| 2810      | 268° | 355° | 3°       |

## 二、地层倾角测井在油田开发中的新应用

### (一) 确定油田区现代构造应力场最大水平主应力方向

由于油田区一般无构造地震,因而缺乏相应的震源机制解资料;而且,油田区皆处于沉积盆地内,利用应力解除法测地应力方向也难以实施。因而,利用地层倾角测井确定油田区现代构造应力场方向尤为重要,下面以大港油田为例来加以说明。

大港油田区的地层倾角测井资料分两类:一是四臂地层倾角测井,二是德莱赛-阿特拉斯地层倾角测井。根据大港油田32口井地层倾角测井测量应力场方向的结果(表2,图4),得到了大港油田现代构造应力场特征:

表2 大港油田地层倾角测井应力测量结果

| 编 号 | 井 号    | 井 深 (m)   | 崩落椭圆长轴方位 | 最大水平主应力方向 |
|-----|--------|-----------|----------|-----------|
| 1   | 高 11   | 2295—3895 | 345°     | 69.5°     |
| 2   | 高 7    | 2248—3965 | 347°     | 71.5°     |
| 3   | 高 6    | 2725—3950 | 175°     | 83.5°     |
| 4   | 塘 20   | 2020—2814 | 207°     | 111.5°    |
| 5   | 板深 67  | 3117—4182 | 3°       | 87.5°     |
| 6   | 港深 23  | 2910—4060 | 326°     | 50.5°     |
| 7   | 板深 2   | 2510—3090 | 4°       | 88.5°     |
| 8   | 港深 42  | 2910—3544 | 358°     | 82.5°     |
| 9   | 岐北 13  | 2350—2520 | 183°     | 87.5°     |
| 10  | 枣 130  | 1647—3069 | 338°     | 62.5°     |
| 11  | 枣 44   | 1490—2400 | 328°     | 52.5°     |
| 12  | 枣 1581 | 2940—3070 | 337°     | 61.5°     |
| 13  | 枣 59   | 2700—3022 | 328°     | 52.5°     |
| 14  | 枣 1546 | 2814—2958 | 328°     | 52.5°     |
| 15  | 枣 1346 | 1340—3070 | 318.5°   | 43°       |
| 16  | 枣 1512 | 2820—2994 | 147°     | 51.5°     |
| 17  | F40-20 | 1512—2430 | 335°     | 59.5°     |
| 18  | 枣 90   | 1420—3012 | 143°     | 47.5°     |
| 19  | 官 143  | 2009—3146 | 345°     | 69.5°     |
| 20  | 乌 17   | 1770—3128 | 151°     | 55.5°     |
| 21  | 乌 24   | 1748—3301 | 325°     | 59.5°     |
| 22  | 小 9    | 1820—2304 | 355°     | 79.5°     |
| 23  | 王 16   | 1660—2610 | 145°     | 49.5°     |
| 24  | 王 17   | 1770—3128 | 151°     | 55.5°     |
| 25  | 王 26   | 1785—3285 | 355°     | 79.5°     |
| 26  | 女 83   | 1293—2658 | 340°     | 64.5°     |
| 27  | 女 88   | 3400—3852 | 10°      | 94.5°     |
| 28  | 女 90   | 3100—3613 | 4°       | 88.5°     |
| 29  | 女 70   | 3040—3400 | 14°      | 98.5°     |
| 30  | 女 77-1 | 1415—2600 | 335°     | 59.5°     |
| 31  | 灯 1    | 2346—4046 | 338°     | 61.5°     |
| 32  | 盐 14   | 1100—1708 | 183°     | 87.5°     |

(1) 地层倾角测量结果表明大港油田区现代构造应力场最大水平主应力方向的变化范围为  $N49.5^{\circ}$ — $110.5^{\circ}E$ , 其主体方向为  $N70^{\circ}$ — $80^{\circ}E$ , 因此, 该区域现代构造应力场最大水平主应力方向为北东东向, 统一于渤海湾盆地的北东东向应力场中。

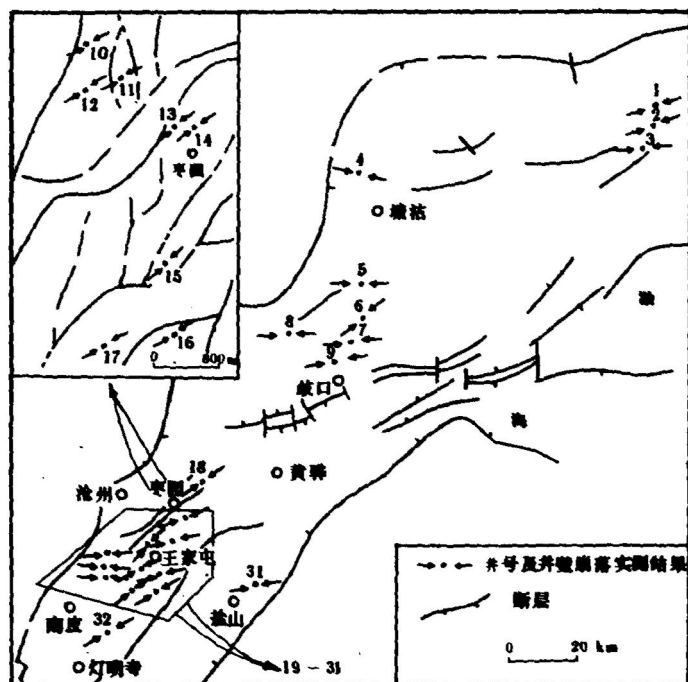


图4 大港油田地层倾角测井实测  
最大水平主应力方向平面图

下压裂缝的延伸方向是个较为困难的过程；但是，可以通过地层倾角测井确定油田区现代构造应力场最大水平主应力方向，从而预测人工压裂缝的延伸方向（图5）。

理论和大量实际资料已证明：人工压裂张性破裂总是沿着阻力最小的方向即垂直最小主应力方向的平面内发生破裂。裂缝性质由三项主应力（最大水平主应力  $S_H$ ，垂直主应力  $S_V$ ，最小水平主应力  $S_h$ ）大小而定：若  $S_H > S_V > S_h$  就会出现垂直裂缝；若  $S_H > S_h > S_V$ ，就会出现水平裂缝。根据已有水力压裂实验资料，渤海湾盆地各油田主应力状态为  $S_H > S_V > S_h$ ，因此，人工压裂缝都

(2) 枣园油田局部现代构造应力场最大水平主应力方向为  $N43^\circ-62.5^\circ E$ ，主要集中在  $N50^\circ-60^\circ E$  之间。这表明，尽管存在统一的应力场，但由于大港油田地处黄骀坳陷，是一个多断块区，局部构造较为发育，因而该区现代构造应力场最大水平方向有一定范围的变化。特别是枣园油田区，由于受风化店构造的局部影响，最大水平主应力方向向北发生了  $20^\circ-30^\circ$  的偏转。反映了局部构造对区域构造应力场的影响。

## (二) 预测人工压裂缝的延伸方向

在油田人工压裂中，人们较为关注压裂缝的延伸方向。利用油井压裂记录，只能得到主应力大小，而不能得其方向。测定地

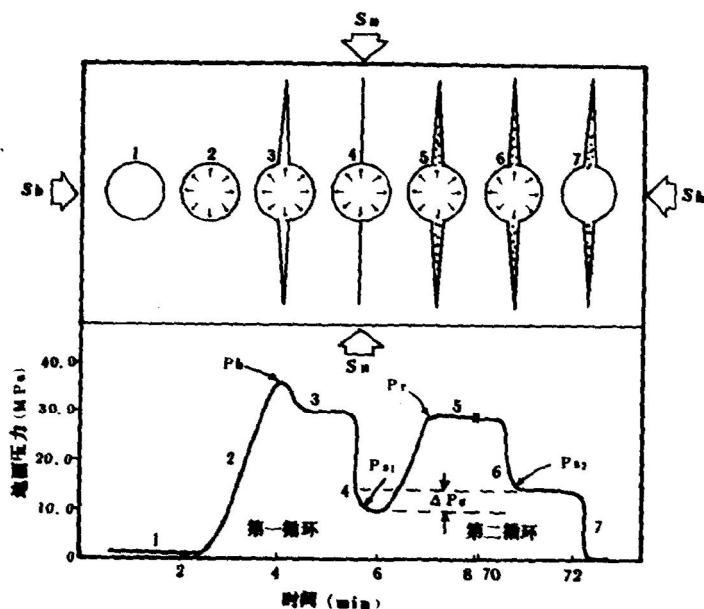


图5 人工压裂的受力状况和破裂过程

$S_H$ —最大水平主应力， $S_h$ —最小水平主应力， $P_b$ —岩石破裂压力，  
 $P_r$ —瞬时闭合压力， $P_{s1}$ —裂缝重张压力

是垂直裂缝, 并沿最大主应力方向延伸。

据丁健民等<sup>[6]</sup>, 在唐山古冶的水力压裂应力测量钻井中, 测得了该区平均最大水平主应力方向为  $N78^{\circ}E$ 。1983 年, 大港油田在天津地区采用地面电测法, 测得 2000 余米深度上水压破裂面方向为北东到北东东向。又如中原油田 1987 年 4 月在 12 井附近的胡 12-17 井压裂施工时, 发现与距该井 150m 的胡 12-18 井压窜, 其破裂面为  $N110^{\circ}E$ , 与胡 12 井最大水平主应力方向 ( $N108^{\circ}E$ ) 非常接近<sup>[7]</sup> (图 6)。

因此, 借助地层倾角测井确定的油田区现代构造应力场最大水平主应力方向, 可预测人工压裂缝的延伸方向。

### (三) 在油田布置油水井网中的作用

由于人工压裂缝总是沿最大主应力方向延伸, 因此根据地层倾角测井确定的油田区应力场方向, 对油田注水开发中的井网布置至关重要。目前, 这方面的应用已引起了国内外学者的重视。

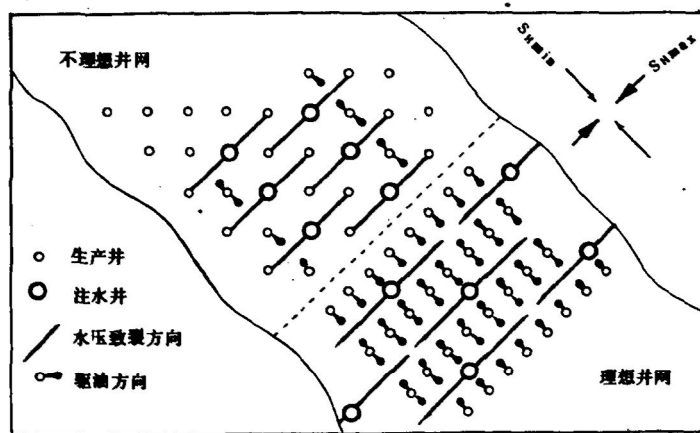


图 7 注水压裂下的井网布置图

$S_{Hmax}$ —最大水平主应力,  $S_{Hmin}$ —最小水平主应力

中一些油田由于未考虑这一方向, 油水井相间排列, 结果在开采初期, 产油量迅速上升, 但在四个月以后, 采油井几乎水淹, 产量下降, 后来进行了井网调整, 效果明显改善。

胜利油田渤南五区早期部署开发井网时, 由于没有考虑地应力方向, 使一些注采相间井

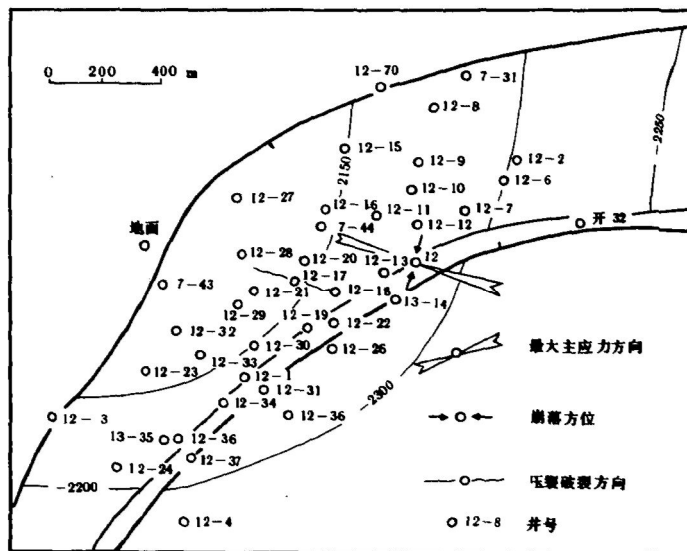


图 6 油井压裂窜井方位与最大水平主应力方向的比较

王世顺提出了应用地应力提高油藏整体开发效益的设想<sup>[8]</sup>, 认为应沿最大水平主应力布油水井排, 这样可最大限度地避免油水井窜, 提高水驱控制能力和采收率。加拿大学者贝尔 (Bell) 也提出了类似的建议<sup>[9]</sup>, 其中理想的井网是沿最大水平主应力方向布置一排油井, 一排水井, 油井和水井不相间排列 (图 7)。

贝尔列举了加拿大彭比纳油田作为实例。彭比纳油田最大主应力方向为  $NE-SW$  向, 其

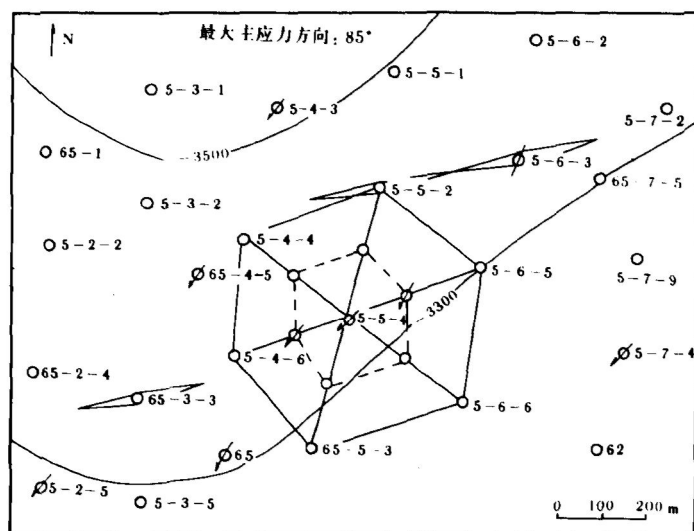


图8 胜利油田渤南五区开发井网部署图

的分布正好沿这一地区最大水平主应力方向(图8中实线),随着压裂采油和注水井的增加,出现了沿最大主应力方向的采油井含水率上升明显高于其它方向的现象,有些井甚至完全水淹。其中采油井义5-5-2与注水井义5-6-3井,由于二井连线与最大水平主应力方向一致(N85°E),使义5-6-3井经两次压裂后与义5-5-2井串通,注水的当天,注入水就从采油井中喷出,使该油井含水量猛增到100%并遭水淹。后经分析研究调整了注采井,使注水井与采油井连线避开了最大水平主应力方向,在65-3-3井压裂采

油,5-2-5、65、65-4-5三口井压裂注水,结果增产效果明显。该井压裂前日产油9t,含水高达56%;压裂后日产油增至30t,含水却下降到5.6%。

由此可见,现代构造应力场最大水平主应力方向,在油田注水开发中具有重大意义,它可指导油田油水井网的布置。当然,沿最大主应力方向布设油水井排这一理想模式,还有待于进一步从理论和实际中进行研究,由于各个油田地质构造不同,裂缝系统和其它因素的影响,对不同的油田要进行具体分析,以总结出一套符合实际的布井方案。

本文是在叶洪研究员的精心指导下完成的,同时还得到中国石油天然气总公司科技发展局石宝珩副局长,大港石油管理局张昭菊高工、张德元高工,本所陈国光工程师等的大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢。

#### 参 考 文 献

- 1 Bell J S, Gough D I. North east-southwest compressive stress in Alberta; Evidence from oil wells. *Earth and Planetary Science Letters*, 1979; 45: 475—482
- 2 Gough D I, Bell J S. Stress orientations from oil-well fractures in Alberta and Texas. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1981; 18: 638—645
- 3 Gough D I, Bell J S. Stress orientation from borehole wall fractures with examples from Colorado, East Texas and Northern Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1982; 19: 1358—1370
- 4 Bliimling P, Fuchs K, Schneider T. Orientation of the stress field from breakouts in a crystalline well in a seismic active areas. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1983; 33: 250—254
- 5 丁健民, 梁国平等. 根据井壁崩落椭圆确定地壳应力方向. *地震学报*, 1987; 9 (2): 143—153
- 6 丁健民, 梁国平. 唐山、天津和沧州地区的油井水力压裂应力测量. *地震学报*, 1985; 7 (4): 363—373.
- 7 丁健民. 水力压裂、孔壁崩落应力测量及其在油气田开发中的应用. 见: 张德元, 王优龙主编. *油田开发与地震减灾*. 北京: 石油工业出版社, 1991; 336—342
- 8 王世顺. 利用地应力提高油藏整体压裂开发效益的设想. 见: 张德元, 王优龙主编. *油田开发与地震减灾*. 北京: 石油

工业出版社, 1991, 336—342

- 9 Bell J S. Investigating stress regimes in sedimentary basins using information from oil industry wireline logs and drilling records, *Geological Applications of wireline logs. Geological Society Special Publication*, 1990, 48, 305—325

## NEW USAGE OF DIPMETER LOG IN OILFIELD DEVELOPMENT

Zhang Hua Qu Guosheng

(*Institute of Geology, State Seismological Bureau, Beijing*)

Yan Chengxin

(*Logging Company, Dagang Petroleum Administration, Tianjin*)

### Abstract

The stretching direction of artificial compressed fractures could be determined with the aid of principle horizontal stress direction of modern tectonic stress field in oilfield area that was measured in dipmeter logging, and the proper disposal of oil-water well network could be made under its guidance. An ideal well network would be that one rank of oil-wells and one rank of water-wells dispose along the principle horizontal stress direction. The oil-wells and water-wells would not be arranged alternatively.