文章编号：1006-6616（2013）02-0117-08

屯 1 井差应变分析法地应力测量

白金朋[1,2,3]，彭　华[1,2,3]，郑哲夏[4]，刘　崇[5]，
马秀敏[1,2,3]，姜景捷[1,2,3]，李　振[1,2,3]

（1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
2. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室，北京 100081；
3. 中国地质科学院地应力测量与监测重点实验室，北京 100081；
4. 中国地质大学能源学院，北京 100083；
5. 中国石化河南油田分公司工程技术研究院，南阳 473132）

摘　要：介绍了差应变分析法（DSA）原地应力测量技术原理，并采用此法对河南省洛阳—伊川盆地屯 1 井岩样进行了测试，结果显示该井 1153.4 ~ 1167.8 m 处最大水平主应力为北西向（141°—157°），与钻孔崩落椭圆长轴方位统计得到的最大水平主应力方向一致；最大水平应力数值小于铅直应力，属于正断层应力状态；主应力随深度线性增大。对该区域注采井网布局给出了建议，即本区注采井网布设应避免与 141°—157°方向平行。

关键词：地应力测量；差应变分析法；屯 1 井；注采井网布局
中图分类号：TU459^{+}.4　　**文献标识码**：A

0　引言

地应力是控制油气富集区分布、水力压裂裂缝扩展、储集层裂缝分布、油井套管破坏等重要因素之一，是油气田开发方案的制定及油井工程设计必不可缺的基础数据[1~3]。因此地应力研究在油气勘探开发中有着十分重要的意义。

油气资源多赋存于深部岩层，因此需要开展深部地应力测量。获取深部地应力状态的方法不多，岩心差应变分析（DSA）是比较经济又有效的方法之一[4]，该方法通过在实验室内对 30 mm × 30 mm × 30 mm（正方体）或 ϕ25 mm × 30 mm（圆柱体）定向试验样品进行围压加载试验及应力张量计算，即可得出测试岩样所处位置的三维地应力状态[5]，有一定的优势。

屯 1 井在构造上属于河南省中西部的洛阳—伊川盆地，该盆地面积约 3000 km^2，前期地球物理勘探显示该盆地三叠系油气储藏量巨大。屯 1 井钻进过程中在 635 ~ 1882 m 井段均有不同程度油气显示，该井实施压裂作业后日产天然气稳定在 6600 ~ 7200 m^3。本文采用 DSA

收稿日期：2013-01-23
基金项目：国家海洋地质保障工程项目（GZH201200504）
作者简介：白金朋（1987-），男，硕士研究生。E-mail：baijinpeng1987@yeah.net
导师简介：彭华（1964-），男，研究员，主要从事地应力测量及相关测量仪器研制、地壳稳定性调查与评价、地质灾害、岩石稳定性和岩石力学与工程施工等方面的研究工作。E-mail：ph68486797@aliyun.com

技术进行了地应力测试，了解该地区构造应力状态与油气藏岩石裂缝的空间展布，指导油气开发方案的制定和压裂改造的实施。

1 差应变分析（DSA）法

1.1 基本原理

岩心在地下深处受地应力作用处于压缩状态，本身含有的天然裂隙也处于闭合状态；当其从地下深处被取出后，应力解除，各方向微裂隙张开，致使岩心体积发生膨胀。微裂隙的空间分布与原岩应力方向有关，微裂隙的数量和发育强度与原岩应力大小成正比。对岩心加压进行不同方向的差应变分析，可以得到最大及最小主应力的方向，这种方法称为差应变分析（DSA）法。DSA 法有以下 4 点假设：①地应力释放将在岩心内产生微小裂隙；②这些裂隙的排列受原地应力场影响；③裂隙的体积与所受的原地应力大小成比例；④卸压膨胀后的试件在施加围压后，任一方向上的压缩量与该方向的膨胀应变量有关[5~8]。

在试验时，对岩样施加围压过程中，岩心的变形主要来自于应力释放而产生的微裂隙闭合变形以及岩石固体变形。图 1 是岩样加载后的应变与压力关系曲线，曲线分为两部分，第一部分（曲线 *OA*）是由于微裂隙闭合和岩石固体变形引起的应变；第二部分（曲线 *AB*）为岩石固体变形引起，两部分斜率之差反映了单独由微裂隙闭合而引起的应变。在岩样上粘贴应变片测量不同方向上的压力 – 应变曲线，通过张量分析计算，可求出最大主应变（及最大主应力）的方向。岩石的压缩可看作应力释放时岩石膨胀的逆过程，当岩石的力学性质为各向同性，且知道一主应力值时，则可利用主应变的比值关系确定地应力的大小[9]。

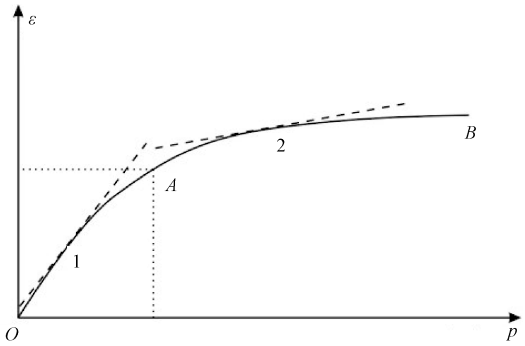


图 1 岩石静水压力 – 应变曲线

Fig. 1 Strain curve of rock hydrostatic pressures

1.2 测试步骤

①从油田现场选取柱状岩心（直径 100 mm），要求岩心完整且无裂隙发育，记录该岩心相应的位置和深度。

②在岩心柱面绘一条平行于岩心轴线并标有方向的标志线，这条线是差应变分析法和古地磁法岩心定向测量共同的参考线。

③将岩心加工制成边长为 30 mm 的正方体，并确保正方体岩样侧面上基线与岩心标志线平行且位于一个平面内（不发生旋转与错位），依据基线选定坐标系，在正方体的 3 个相互垂直的面上贴应变花，并依次对每个应变片编号（见图 2），一共贴上 3 组应变花。岩样需用硅橡胶涂层覆盖防止岩样被试验液体侵入，此时试样制备完毕。

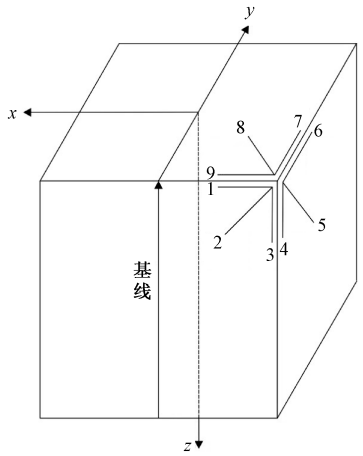


图 2　应变片分布图

Fig. 2　Distribution of strain gauge

④将制备好的岩样安置在压力容器中，以小于 0.01 MPa/s 的连续加载速度加载静水压力至超过岩样所在地层的水平压力，同步记录应变值，绘制出应力－应变曲线。加压和卸压重复 3 次以上[10~14]。

1.3　地应力大小和方向的确定

测试岩样随着静水压力增加至超过岩样所在地层的水平压力，岩样每一个方向上的应变片可得到如图 1 所示的压力－应变曲线。对该曲线求导得到压力－应变的一次导数曲线，从该曲线上可求得图 1 所示的两部分曲线的平均斜率，分别为 θ_i 与 ξ_i，令 $\varepsilon_i = \theta_i - \xi_i$（$i = 1, 2, 3, \cdots, 9$），此即为微裂缝闭合引起的应变变化。

根据得到的 ε_i 可计算相应的岩心坐标系上的 6 个应变分量（ε_x，ε_y，ε_z，ε_{xy}，ε_{yz}，ε_{zx}）：

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \dfrac{1}{2}(\varepsilon'_1 + \varepsilon'_9) \\ \varepsilon_y = \dfrac{1}{2}(\varepsilon'_6 + \varepsilon'_7) \\ \varepsilon_z = \dfrac{1}{2}(\varepsilon'_3 + \varepsilon'_4) \\ \varepsilon_{xy} = 2\varepsilon'_8 - \varepsilon_x - \varepsilon_y \\ \varepsilon_{yz} = 2\varepsilon'_5 - \varepsilon_y - \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xz} = 2\varepsilon'_2 - \varepsilon_z - \varepsilon_x \end{cases} \tag{1}$$

上式中 ε_x、ε_y、ε_z 是 x，y，z 方向的正应变；ε_{xy}、ε_{yz}、ε_{zx} 是剪应变；$\varepsilon'_1, \varepsilon'_2, \cdots, \varepsilon'_9$ 是应变片读数。

三个主应变的大小是下列三次方程的三个根：

$$\begin{aligned} &\varepsilon^3 - (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)\varepsilon^2 + (\varepsilon_x\varepsilon_y + \varepsilon_y\varepsilon_z + \varepsilon_x\varepsilon_z - \varepsilon_{xy}^2/4 - \varepsilon_{yz}^2/4 - \varepsilon_{xz}^2/4)\varepsilon \\ &\quad - (\varepsilon_x\varepsilon_y\varepsilon_z - \varepsilon_x\varepsilon_{yz}^2/4 - \varepsilon_y\varepsilon_{xz}^2/4 - \varepsilon_z\varepsilon_{xy}{}^2/4 + \varepsilon_{yz}^2\varepsilon_{xz}^2\varepsilon_{xy}^2/4) = 0 \end{aligned} \tag{2}$$

解出上述方程的三个根 ε_{11}、ε_{22}、ε_{33} 即可得到主应变大小[15~17]。

主轴方向余弦可由下式计算：

$$\begin{cases} l_i = \dfrac{A_{ii}}{\sqrt{A_{ii}^2 + B_{ii}^2 + C_{ii}^2}} \\ m_i = \dfrac{B_{ii}}{\sqrt{A_{ii}^2 + B_{ii}^2 + C_{ii}^2}} \\ n_i = \dfrac{C_{ii}}{\sqrt{A_{ii}^2 + B_{ii}^2 + C_{ii}^2}} \end{cases} \tag{3}$$

在式（3）中，$A_{ii} = (\varepsilon_y - \varepsilon_{ii})(\varepsilon_z - \varepsilon_{ii}) - \varepsilon_{zy}\varepsilon_{yz}/4$，$B_{ii} = \varepsilon_{zy}\varepsilon_{xz}/4 - \varepsilon_{xy}/2(\varepsilon_z - \varepsilon_{ii})$，$C_{ii} = \varepsilon_{xy}\varepsilon_{yz}/4 - \varepsilon_{xz}/2(\varepsilon_y - \varepsilon_{ii})$；$\varepsilon_{ii}$（$i=1, 2, 3$）为主应变大小。由 l_i、m_i、n_i（$i=1, 2, 3$）可求得三个主应变方向和倾角[8]。

解出的三个主应变方位即为其所对应的 3 个主应力的方向。在考虑孔隙压力和材料各向同性时，主应力大小的比值为：

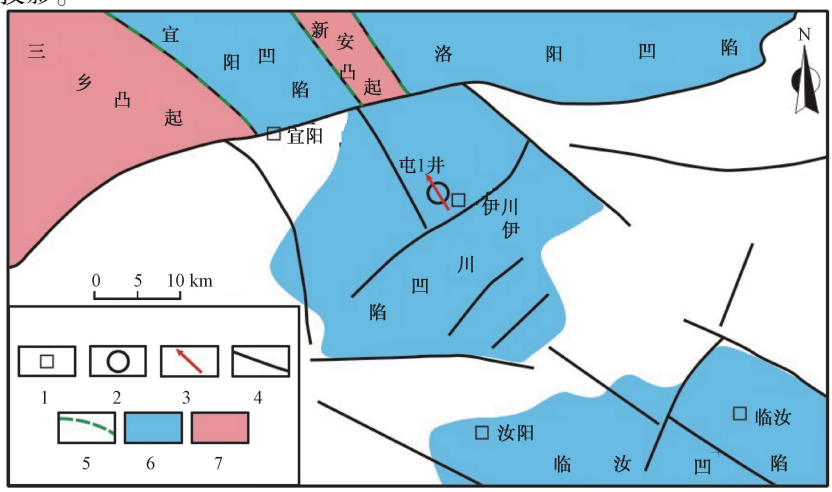
$$(\sigma_{11} - p_0):(\sigma_{22} - p_0):(\sigma_{33} - p_0) =$$
$$[\mu(\varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) + (1-\mu)\varepsilon_{11}]:[\mu(\varepsilon_{33} + \varepsilon_{11}) + (1-\mu)\varepsilon_{22}]:[\mu(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) + (1-\mu)\varepsilon_{33}] \tag{4}$$

式（4）中：μ 为泊松比，p_0为孔隙压力。

由于差应变分量只能计算出主应力比值，假定岩石铅直应力为上覆岩层的重量，则根据主应力比值可计算出三维主应力值[17]。

2 测量结果

对洛阳—伊川盆地屯 1 井 6 块岩样进行了 DSA 测试，屯 1 井位置如图 3，所取 6 块岩心的详细位置和岩性如表 1。测试得到了主应力轴应变比率和主轴方位、倾角；根据上覆岩层的重量以及平均主应变比值计算主应力值，得到三维主应力（见表 2）。图 4 是测得的主应力方向赤平投影。



1—地名；2—井位；3—最大水平主应力方位；4—断层；5—构造单元边界；6—凹陷；7—凸起

图 3 屯 1 井井孔位置及最大水平主应力方向

Fig. 3 Position of the Well Tun-1 and its maximum horizontal principal stress orientation

表 1　屯 1 井 DSA 试件深度及岩性

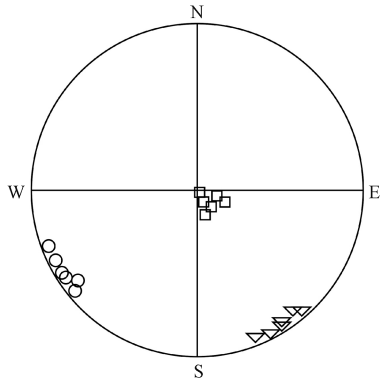
Table 1　Depth and lithology of test specimen from the Well Tun-1

试件编号	采样深度/m	岩性	试件编号	采样深度/m	岩性
C1-1	1153.4	灰色泥质粉砂岩	C2-1	1167.3	灰色粉砂质泥岩
C1-2	1153.6	灰色泥质粉砂岩	C2-2	1167.5	灰色粉砂质泥岩
C1-3	1153.8	灰色泥质粉砂岩	C2-3	1167.8	灰色粉砂质泥岩

表 2　屯 1 井 DSA 地应力测量结果

Table 2　In-situ stress values from the Well Tun-1 measured by DSA

试件编号	最大主应力			中间主应力			最小主应力		
	方位/(°)	倾角/(°)	大小/MPa	方位/(°)	倾角/(°)	大小/MPa	方位/(°)	倾角/(°)	大小/MPa
C1-1	323	84	28.1	143	-3	23.1	53	6	18.4
C1-2	321	87	28.1	141	-2	23.2	51	3	18.2
C1-3	327	86	28.2	147	-3	23.2	57	3	18.2
C2-1	337	88	28.5	157	-2	23.0	67	1	18.3
C2-2	332	89	28.5	152	-2	23.5	62	2	18.6
C2-3	328	88	28.5	148	-2	23.7	58	2	18.6



□—最大主应力投影；△—中间主应力投影；○—最小主应力投影

图 4　钻孔应力赤平投影图

Fig. 4　Stereographic projection of principal stress in the drill hole

由表 2 和图 4 可以看出：1153.4 ~ 1167.8 m 井段最大主应力值在 28.1 ~ 28.5 MPa 之间，平均值为 28.3 MPa；方位角在 321°—337°之间变化，平均方位角为 328°；倾角为 84°—89°，平均值为 87°。中间主应力值在 23.0 ~ 23.7 MPa 之间，平均值 23.3 MPa；方位角为 141°—157°，平均值为 148°；倾角 -2°至 -3°，平均值为 -2°。最小主应力值 18.2 ~ 18.6 MPa，平均值为 18.4 MPa；方位角为 51°—67°，平均值为 58°；倾角为 1°—6°，平均值为 3°。

由上述测试结果可知，伊川屯 1 井的最大主应力倾角较陡，近于垂向；中间主应力和最小主应力倾角较小，近于水平向。其中最大主应力为北西向，最小主应力为北东向。水平最大主应力方位见图 3。

3　钻孔崩落法最大水平地应力方向

声波成像和电成像测井发现屯 1 井有钻孔崩落现象（见图 5）。对钻孔 1154 ~ 2000 m 崩

落椭圆长轴方位进行的统计表明：最大水平主应力平均方位为北东 145°—345°（见图 6），与 DSA 法得到最大水平主应力方位基本一致。

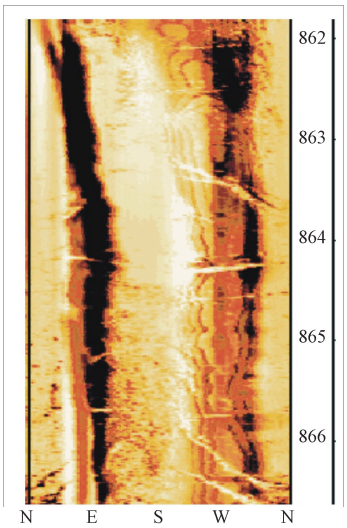
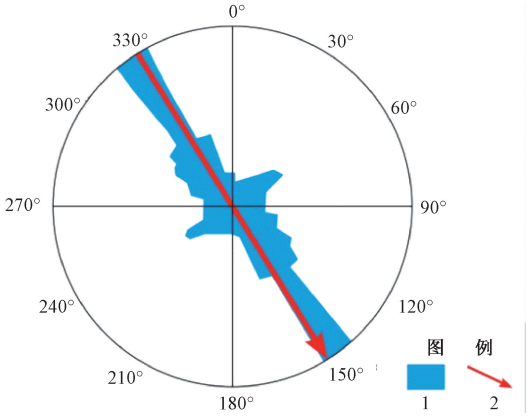


图 5 声波测井成像图像

Fig. 5 Image of sonic imaging logging of the Well Tun-1



1—钻孔崩落椭圆确定最大水平主应力方向；

2—DSA 法得到的最大水平主应力方向

图 6 屯 1 井钻孔崩落确定的地应力方向

（钻孔 1154 ~ 2000 m 深度段统计）

Fig. 6 In-situ stress direction of the Well Tun-1 based on borehole breakouts data

4 测试结果讨论

由地应力测量结果可以看出，水平应力小于竖直应力，为正断层应力状态。

屯 1 井 1153.4 ~ 1167.8 m 最大水平主应力为北西向（141°—157°），最大水平主应力值在 23.0 ~ 23.7 MPa 之间。深部（1747.4 ~ 1747.9 m）最大水平主应力为北东东向（80°—85°），最大水平主应力值在 34.7 ~ 34.9 MPa 之间。最大主应力随深度线性增加。

岩体裂缝方向的展布与应力场的分布密切相关[18~19]，根据得到的地应力状态推断洛阳—伊川地区构造裂缝的展布方位为 141°—157°。油田压裂时，应避免沿水平最大主应力方向布设注采井网[20~21]，即本区注采井网布设应避免与 141°—157°方向平行。

该结果可用于洛阳—伊川盆地的勘探生产设计。

参 考 文 献

[1] 刘建中，张金珠，张雪. 油田应力测量［M］. 北京：地震出版社，1993.

LIU Jian-zhong, ZHANG Jin-zhu, ZHANG Xu. In-situ Stress Measurement of Oil Field［M］. Beijing: Earthquake Press, 1993.

[2] 邓金根，黄荣樽，田效山. 油田深部地层地应力测定的新方法［J］. 石油大学学报：自然科学版，1997，21（1）：32 ~ 35.

DENG Jin-gen HUANG Rong-zun, TIAN Xiao-shan. A new method for measuring deep in-situ stresses of oil fields［J］. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Sciences, 1997, 21（1）: 32 ~ 35.

[3] 王连捷，孙宝珊，王薇，等. 地应力对油气运移的驱动作用［J］. 地质力学学报，2011，17（2）：132 ~ 143.

WANG Lian-jie, SUN Bao-shan, WANG Wei, et al. Driving effect of the crustal stress on petroleum migration［J］.

Journal of Geomechanics, 2011, 17 (2): 132 ~ 143.

[4] 石林，张旭东，金衍，等. 深层地应力测量新方法 [J]. 岩石力学与工程学报，2004，23 (14)：2355 ~ 2358.
SHI Lin, ZHANG Xu-dong, JIN Yan, et al. New method for measurement of in-situ stresses at great depth [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004 23 (14): 2355 ~ 2358.

[5] Sinha B K, Plona T J. Wave propagation in rocks with elastic-plastic deformations [J]. Geophysics, 2001, 66 (3): 772 ~ 785.

[6] Strickland F D, Ran N K. Predicting the in-situ stress for deep wells using differential strain curve analysis [J]. SPE 8954, 1980: 251 ~ 255.

[7] 彭华，马秀敏，姜景捷. 差应变法地应力测量：以汶川地震断裂带科学钻探 WFSD-1 钻孔为例 [J]. 地质力学学报，2011，17 (3)：249 ~ 261.
PENG Hua, MA Xiu-min, JIANG Jing-jie. In-situ stress measurement by Differential Strain Analysis method in WFSD-1 [J]. Journal of Geomechanics, 2011, 17 (3): 249 ~ 261.

[8] 侯守信，田国荣. 古地磁岩心定向及其在地应力测量上的应用 [J]. 地质力学学报，1999，5 (1)：90 ~ 96.
HOU Shou-xin, TIAN Guo-rong. Palaeomagnetic orientation of cores and its applications for in-situ stress measurements [J]. Journal of Geomechanics, 1999, 5 (1): 90 ~ 96.

[9] 田国荣. 差应变分析与古地磁结合确定地应力方向 [D]. 北京：中国地质大学，2002：5 ~ 29.
TIAN Guo-rong. In-situ stress orientation determination using differential strain analysis and palaeomagnetic orientation [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2002: 5 ~ 29.

[10] 沈海超，程远方，王京印，等. 主方向差应变地应力测量方法 [J]. 新疆石油地质，2008，29 (2)：250 ~ 252.
SHEN Hai-chao, CHENG Yuan-fang, WANG Jing-yin, et al. Principal direction differential strain method for in-situ stress measurement and application [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29 (2): 250 ~ 252.

[11] 程远方，沈海超，赵益忠. 一种简化的差应变地应力测量技术 [J]. 石油钻采工艺，2008，30 (2)：61 ~ 64.
CHENG Yuan-fang, SHEN Hai-chao, ZHAO Yi-zhong. A simplified differential strain analysis stress method for in-situ stress measurement [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30 (2): 61 ~ 64.

[12] 孙连环，鲍洪志，杨顺辉. 准噶尔盆地中部区块地应力求取研究 [J]. 石油钻探技术，2007，35 (2)：18 ~ 21.
SUN Lian-huan, BAO Hong-zhi, YANG Shun-hui. Investigation of terrestrial stress in middle Zhunger Basin [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35 (2): 18 ~ 21.

[13] 韩军，刘洪涛. 差应变分析法在地应力方向研究中的应用 [J]. 石油天然气学报，2005，27 (2)：349 ~ 357.
HAN Jun, LIU Hong-tao. Application of Differential Strain Analysis method on the study of in-situ stress direction [J]. Journal of Petroleum and Natural Gas, 2005, 27 (2): 349 ~ 357.

[14] 金衍，陈勉，郭凯俊，等. 复杂泥页岩地层地应力的确定方法 [J]. 岩石力学与工程学报，2006，25 (11)：2287 ~ 2291.
JIN yan, CHEN Mian, GUO Kai-jun, et al. Study on determination method of in-situ stress for complex silt formations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (11): 2287 ~ 2291.

[15] Gough D I, Bell J S. Stress orientations from oil well fractures in Alberta and Texas [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1981, 18 (3): 638 ~ 645.

[16] 王连捷，崔军文，张晓卫，等. 中国大陆科学钻主孔现今地应力状态 [J]. 地球科学：中国地质大学学报，2006，31 (4)：505 ~ 512.
WANG Lian-jie, CUI Jun-wen, ZHANG Xiao-wei, et al. In-situ stress state in the main borehole of the Chinese Continental Scientific Drilling [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2006, 31 (4): 505 ~ 512.

[17] 崔军文，王连捷，李朋武，等. 中国大陆科学钻探主孔 2000 米以上脆性变形构造应力场 [J]. 岩石学报，2004，20 (1)：73 ~ 80.

CUI Jun-wen, WANG Lian-jie, LI Peng-wu, et al. Tectonic stress field of brittle deformation within 2000 m of the main borehole of Chinese Continental Scientific Drilling [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20 (1): 73 ~ 80.

[18] 葛洪魁，林英松，王顺昌. 地应力测试及其在勘探开发中的应用 [J]. 石油大学学报：自然科学版，1998，22 (1)：94 ~ 99，116 ~ 117.

GE Hong-kui, LIN Ying-song, WANG Shun-chang. In-situ stress determination technique and its applications in petroleum exploration and development [J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1998, 22 (1): 94 ~ 99, 116 ~ 117.

[19] 刘泽凯，陈耀林，唐汝众. 地应力技术在油田开发中的应用 [J]. 油气采收率技术，1994，1 (1)：46 ~ 56.

LIU Ze-kai, CHEN Yao-lin, TANG Ru-zhong. The application of in-situ stress technology in the oilfield development [J]. Oil and Gas Recovery Technology, 1994, 1 (1): 46 ~ 56.

[20] 陶良军，冯兴武，黄青松，等. 宝浪油田地应力和裂缝特征研究与应用 [J]. 钻采工艺，2001，24 (2)：25 ~ 27.

TAO Liang-jun, FENG Xing-wu, HUANG Qing-song, et al. Research and application off ormation stress and fracture feature in Baolang Oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2001, 24 (2): 25 ~ 27.

[21] 王伯军，张士诚，李莉. 基于地应力场的井网优化设计方法研究 [J]. 大庆石油地质与开发，2007，26 (3)：55 ~ 59.

WANG Bo-jun, ZHANG Shi-cheng, LI Li. The well pattern optimization design method based on the earth stress field [J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 2007, 26 (3): 55 ~ 59.

IN-SITU STRESS MEASUREMENT BY DIFFERENTIAL STRAIN ANALYSIS METHOD IN THE WELL TUN-1

BAI Jin-peng[1,2,3], PENG Hua[1,2,3], ZHENG Zhe-xia[4], LIU Chong[5], MA Xiu-min[1,2,3], JIANG Jing-jie[1,2,3], LI Zhen[1,2,3]

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100081, *China*;
2. *Key Lab of Neotectonic Movement and Geohazards, Ministry of Land and Resources, Beijing* 100081, *China*;
3. *In-situ Stress Measurement and Monitoring Key Laboratory, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100081, *China*;
4. *Energy Resources College, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*;
5. *Engineering and Technology Research Institute, Sinopec Henan Oilfield Branch Company, Nanyang* 473132, *China*)

Abstract: The principle method of the Differential Strain Analysis technique is briefly recommended. We tested the rock samples taken from the Well Tun-1 which was located in Luoyang-Yichuan basin in Henan Province. The results shows that the maximum horizontal principal stress is NW orientation (141°—157°) in the well of 1153.4 ~ 1167.8 m, which is consistent with the maximum horizontal principal stress orientation of the drill collapsing ellipse macro axis. Its value is less than vertical stress, and belongs to normal fault stress. The principal stress increases with depth linearity. Advice for the injection-production well pattern in this area is given, that is the pattern shall not parallel to 141°—157° orientation.

Key words: stress measurement; Differential Strain Analysis; Well Tun-1; injection-production well pattern