

由实钻资料反演地应力及井壁稳定

赵海峰, 陈 勉

(中国石油大学 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249)

摘要: 目前确定石油工程中地应力的方法均存在各自的局限性, 为了得到直接反应地应力大小和方向的信息, 提出一种基于实钻资料确定地应力的新方法, 不将井眼看作理想的圆筒, 而是通过力学分析建立井壁围岩的变形程度与岩石物理力学性质、地应力、孔隙压力及钻井液密度的关系, 在此基础上由钻井液录井和常规测井, 反演出地应力及孔隙压力, 并进一步计算井壁坍塌和破裂压力。研究发现, 破裂压力计算值与实测值符合较好, 而反演得到的孔隙压力与实用钻井液密度符合, 说明该方法合理可行。若结合随钻测量, 该方法可实现地应力及井壁稳定的实时预测, 应用前景广阔。

关键词: 岩石力学; 地应力; 坍塌压力; 破裂压力; 孔隙压力; 反演

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2010)增1-2799-06

INVERSE ANALYSIS FROM ACTUAL DATA TO DETERMINE GEOSTRESS AND WELLBORE STABILITY

ZHAO Haifeng, CHEN Mian

(Key Laboratory of Petroleum Engineering, MOE, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: A new method based on actual data to determine geostress is introduced. Without the traditional assumption that wellbore is cylindrical, the relationship among wellbore deformation, rock mechanical properties, geostress, pore pressure and mud density is established by using dual media elastic mechanics. Using this relationship, geostress and pore pressure are inverted from mud log and conventional log. Then collapse pressure and fracture pressure are calculated. The results show that the calculated fracture pressure is in good agreement with the actually measured value, and the inverted pore pressure is in agreement with the practical mud density. The agreement verifies the rationality of this new method. It is a breakthrough to determine earth pressure and pore pressure from actual mud log and conventional log. Due to the basis of rigorous mechanical model and actual data, this new method has high degree of accuracy. With measurements while drilling, this method can predict pore pressure, geostress and wellbore stability at real time. So the method may be widely used.

Keywords: rock mechanics; geostress; collapse pressure; fracture pressure; pore pressure; inverse analysis

1 引言

地应力是客观存在的一种自然力, 它影响着油

气勘探和开发的过程。在油气田钻井和开发中, 掌握油气储集区域构造应力的方向和方位, 可以进行油气田开发井网布置和优选钻井泥浆的密度来稳定井壁, 减少或避免诸如漏、喷、塌、卡等事故造成

收稿日期: 2008-11-12; 修回日期: 2009-03-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06A109-1-1-1)

作者简介: 赵海峰(1980-), 男, 博士, 2002年毕业于北京大学力学与工程科学系应用力学专业, 现任讲师, 主要从事石油工程和岩石力学等方面的教学与研究工作。E-mail: zhaohf@cup.edu.cn

的严重经济损失和人身事故等^[1, 2]。目前石油工程中确定地应力的方法主要有各种岩芯试验、水力压力曲线解释、测井解释以及地震属性反演, 这些方法均具有各自的优点和局限。

岩芯试验是公认准确确定深层地应力的方法之一, 针对各种地层和岩芯条件分别有围压 Kaiser 效应法、声速各向异性与 Kaiser 效应复合法等, 用于超深井、薄层岩芯等特殊条件^[3-6]。岩芯试验具有精度高的优点, 但只能在钻后进行, 取得的数据点有限而难以对整个井段的地应力进行精确描述, 且花费较大。水力压裂法测量地应力最初是从石油开采过程中, 对油井实施水力压裂增产技术发展而来的深部岩体地应力测量方法, 随后水力压裂地应力测量技术在世界范围内得到了推广和应用^[7-11]。但压裂往往只能在需要改造的储层进行, 所以作为地应力测量方法局限较大。测井解释是目前广泛应用的全井段地应力分布计算方法, 包含较多的经验关系, 在准确获取有关岩石力学参数计算系数的基础上可以得到理想结果^[12-15]。测井解释最大的缺点是只能在钻后进行, 指导钻井的时效性较差, 且该方法并未使用井眼变形、实用钻井液密度等直接反映地应力大小和方向的钻井参数。地震属性反演是目前较新的一种在钻前对地应力和井壁稳定进行预测的方法^[16], 由于该方法只使用预测地层的地震资料而不涉及实钻资料, 加上反演的分辨率限制, 仅能供钻井设计参考。

地层钻开后, 井眼的变形程度与地应力及孔隙压力密切相关, 本文基于双重介质弹性力学得到井眼变形程度与岩石物理力学性质、地应力、孔隙压力及钻井液密度的关系, 在此基础上由钻井液录井和常规测井, 反演出地应力及孔隙压力, 并进一步计算井壁坍塌和破裂压力。研究发现, 破裂压力计算值与实测值符合较好, 而反演得到的孔隙压力与实用钻井液密度符合, 说明该方法合理可行。本文提出的方法与随钻测量技术结合可以进行地应力及井壁稳定的实时预测, 对钻井风险控制意义较大, 应用前景广阔。

2 直井实钻反演理论

地层总是处于三轴应力作用, 故可用 3 个方向的主应力来表示, 即最大水平主应力 σ_H , 最小水平

地应力 σ_h 和上覆压力 σ_v 。地层钻开后应力重新分布, 并眼处在钻井液柱压力和原地应力的联合作用下, 若假定地层为弹性体且满足平面应变假定, 并壁钻井液滤失满足达西定律, 则并眼周围地层的应力分布可由叠加原理得到

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{r_i^2}{r^2} p_i + \frac{(\sigma_H + \sigma_h)}{2} \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \cdot \\ &\quad \left(1 + \frac{3r_i^4}{r^4} - \frac{4r_i^2}{r^2} \right) \cos(2\theta) + \\ &\quad \delta \left[\frac{\alpha(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2} \right) - \phi \right] (p_i - p_p) \\ \sigma_\theta &= -\frac{r_i^2}{r^2} p_i + \frac{(\sigma_H + \sigma_h)}{2} \left(1 + \frac{r_i^2}{r^2} \right) - \frac{(\sigma_H - \sigma_h)}{2} \cdot \\ &\quad \left(1 + \frac{3r_i^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) + \delta \left[\frac{\alpha(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \left(1 + \frac{r_i^2}{r^2} \right) - \phi \right] \cdot \\ &\quad (p_i - p_p) \\ \sigma_z &= \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \left(\frac{r_i}{r} \right)^2 \cos(2\theta) + \\ &\quad \delta \left[\frac{\alpha(1-2\nu)}{1-\nu} - \phi \right] (p_i - p_p) \\ \tau_{r\theta} &= \frac{\sigma_h - \sigma_H}{2} \left(1 - \frac{3r_i^4}{r^4} + \frac{2r_i^2}{r^2} \right) \sin(2\theta) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: r_i 为井眼半径; r 为极坐标半径; p_i 为井内压力; p_p 为地层孔隙压力; θ 为矢径与最大地应力方向的夹角; δ 为与井壁有关的参数, 当井壁有渗透时, $\delta=1$, 当井壁不渗透时, $\delta=0$; ν 为泊松比; ϕ 为孔隙度; α 为有效应力系数。

当 $r_i = r$ 时, 可得无限大地层平面内直井并眼周围的应力分布为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= p_i - \delta\phi(p_i - p_p) \\ \sigma_\theta &= -p_i + [1 - 2\cos(2\theta)]\sigma_H + [1 + 2\cos(2\theta)]\sigma_h + \\ &\quad \delta \left[\frac{\alpha(1-2\nu)}{1-\nu} - \phi \right] (p_i - p_p) \\ \sigma_z &= \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \cos(2\theta) + \\ &\quad \delta \left[\frac{\alpha(1-2\nu)}{1-\nu} - \phi \right] (p_i - p_p) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

井壁上的差应力 $(\sigma_\theta - \sigma_r)$ 值决定了井壁是否发生剪切破坏, 当 $\theta = \pi/2$ 或 $3\pi/2$ 时, $\sigma_\theta - \sigma_r$ 值

达到最大值, 即在点 B, D 处达到 $\sigma_\theta - \sigma_r$ 的最大值, 井眼极坐标系见图 1。图 1 中的 A, B, C, D 表示极角分别为 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 及 270° 的井壁点。由式(2)和莫尔 - 库仑准则可以得到临界的坍塌压力^[1]为

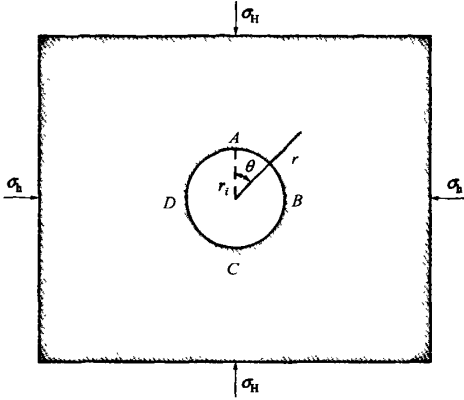


图 1 井眼极坐标系
Fig.1 Will bore polar coordinates

$$\rho_b = \frac{\eta(3\sigma_H - \sigma_h) - 2c_0\beta + \alpha p_p(\beta^2 - 1)}{(\beta^2 + \eta)H} \times 100 \quad (3)$$

其中,

$$\beta = \cot\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$

式中: H 为井深(m), ρ_b 为坍塌压力(g/cm^3), c_0 为岩石的黏聚力(MPa), φ 为内摩擦角($^\circ$), p_p 为孔隙压力, η 为应力非线性修正系数。

应该指出, 式(3)是保持井壁上该地层不允许有任何程度坍塌时的密度值。如果允许井眼有一定的井径扩大率, 井眼形状为椭圆形, 如图 2 所示, 此时式(2)应该重新求解。设描述井径扩大的变量 $m = (R - r_i) / (R + r_i)$ (r_i 为钻头半径, R 为井径扩大处的半径), 认为井壁应力状态为平面应变, 由弹性理论的复势解法, 其应力分布由以下 5 部分叠加得到:

(1) 液柱压力 p_i 引起的应力

椭圆孔边受内压的平面应变问题解为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= p_i \\ \sigma_\theta &= p_i \frac{3m^2 - 1 - 2m \cos(2\varphi)}{1 + m^2 - 2m \cos(2\varphi)} \\ \sigma_z &= \nu p_i \frac{4m^2 - 4m \cos(2\varphi)}{1 + m^2 - 2m \cos(2\varphi)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

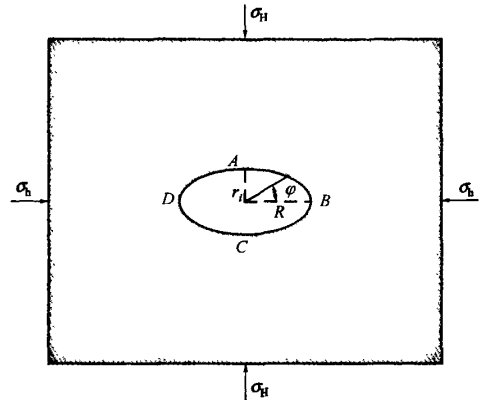


图 2 井壁崩塌椭圆
Fig.2 Elliptic wellbore caused by collapse

(2) 最大水平地应力 σ_H 引起的应力

无限远处受压缩的平面应变椭圆孔边缘应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\theta &= \sigma_H \frac{1 - m^2 - 2m + 2 \cos(2\varphi)}{1 + m^2 - 2m \cos(2\varphi)} \\ \sigma_z &= \nu \sigma_\theta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(3) 最小水平地应力 σ_h 引起的应力

无限远处受压缩的平面应变椭圆孔边缘应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\theta &= \sigma_h \frac{1 - m^2 + 2m - 2 \cos(2\varphi)}{1 + m^2 - 2m \cos(2\varphi)} \\ \sigma_z &= \nu \sigma_\theta \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

(4) 上覆地层压力 σ_v 引起的应力

$$\sigma_z = \sigma_v \quad (7)$$

(5) 钻井液渗流效应

当钻井液造壁性能不佳时, 在井内和地层间将发射液体渗流, 视井壁地层为孔隙介质, 介质中流动满足达西定理, 则井内径向渗流产生在井壁上的附加应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -\phi(p_i - p_p) \\ \sigma_\theta &= \sigma_z = \left[\frac{\alpha(1 - 2\nu)}{1 - \nu} - \phi \right] (p_i - p_p) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

综合以上结果得到允许一定井径扩大率的井壁围岩应力分布

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_r &= p_i - \phi(p_i - p_p) \\
 \sigma_\theta &= \\
 p_i &\frac{3m^2 - 1 - 2m\cos(2\varphi)}{1 + m^2 - 2m\cos(2\varphi)} + \sigma_H \frac{1 - m^2 - 2m + 2\cos(2\varphi)}{1 + m^2 - 2m\cos(2\varphi)} + \\
 \sigma_h &\frac{1 - m^2 + 2m - 2\cos(2\varphi)}{1 + m^2 - 2m\cos(2\varphi)} + \left[\frac{\alpha(1 - 2\nu)}{1 - \nu} - \phi \right] (p_i - p_p) \\
 \sigma_z &= \\
 \nu p_i &\frac{4m^2 - 4m\cos(2\varphi)}{1 + m^2 - 2m\cos(2\varphi)} + \nu \sigma_H \frac{1 - m^2 - 2m + 2\cos(2\varphi)}{1 + m^2 - 2m\cos(2\varphi)} + \\
 \nu \sigma_h &\frac{1 - m^2 + 2m - 2\cos(2\varphi)}{1 + m^2 - 2m\cos(2\varphi)} + \sigma_v + \left[\frac{\alpha(1 - 2\nu)}{1 - \nu} - \phi \right] \cdot \\
 (p_i - p_p) &
 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

要计算允许一定井径扩大率的泥浆密度公式,应用式(9)和莫尔-库仑准则可以得到。由于表达式复杂,这里不列出完整的表达式。忽略钻井液渗流效应的一阶近似表达式和考虑钻井液滤失的一阶近似表达式分别为

$$\rho_b = \frac{\eta P - 2C_0 A + \alpha p_p (A^2 - 1) - Q A^2}{\beta^2 (A^2 + \eta) H} \times 100 \quad (10)$$

$$\rho_b = \frac{\eta [P - (K - \phi) p_p] - 2C_0 A + (\phi p_p - Q) A^2}{\beta^2 [(1 + \phi) A^2 - \eta (K - 1 - \phi)] H} \times 100 \quad (11)$$

其中,

$$P = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} (1 + \beta^2) + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} (1 + 3\beta^2)$$

$$Q = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} (1 - \beta^2) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} (1 - 4\beta^2 + 3\beta^4)$$

$$K = \frac{\alpha(1 - 2\nu)}{1 - \nu}$$

$$\beta = r_i / R$$

式(10), (11)中的地应力可用石油大学六五模式计算, 这样可以把式(10)或式(11)写成如下形式:

$$\rho_b = f(H, \beta, \nu, \sigma_v, C_0, A, \xi_1, \xi_2, P_p) \quad (12)$$

式(12)中除了孔隙压力 P_p 和最大和最小水平构造应力系数 ξ_1, ξ_2 外, 其余参数可由相关测井数据计算出。计算过程取若干个地层深度, 组建关于 ξ_1, ξ_2 和 P_p 的方程组, 利用最小二乘法求拟合解。

3 应用实例

HB1 井是中石化在川东北地区部署的一口直探井, 设计井深为 6 100 m。该井地层年代久远, 地层埋藏深, 地层可钻性差, 研磨性高, 裂缝发育且岩芯易破碎。地层压力系统和地应力分布复杂, 钻前预测偏差较大, 钻井过程中出现多次井壁失稳、井漏及井控事故, 井眼质量差。应用实钻资料反演方法对该井分层进行地应力及井壁稳定计算。计算过程: 以上沙庙组为例, 取 9 个代表性点, 组建关于最大构造应力系数、最小构造应力系数和孔隙压力的 9 个方程, 计算数据见表 1。

利用最小二乘法求拟合解, 得到最大构造应力系数、最小构造应力系数和孔隙压力。实钻反演结果见表 2。

基于以上反演的构造应力系数和孔隙压力数据, 可以计算出地应力、坍塌压力及破裂压力剖面, 如图 3, 4 所示。从图 4 可以看出, 破裂压力的计算值与现场测量值符合, 而孔隙压力与实用泥浆密度符合, 说明该反演方法的合理性。

表 1 计算数据

Table 1 Calculation data

井深/m	泥浆密度/(g·cm ⁻³)	井径扩大率	参数 β	泊松比	上浮压力/(g·cm ⁻³)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	参数 A
1 006	1.26	0.097 71	0.910 98	0.230 00	2.465 37	14.239 74	29.367 30	1.710 17
1 103	1.26	0.416 57	0.705 93	0.220 39	2.427 89	6.786 23	30.110 38	1.735 91
1 206	1.27	0.517 71	0.658 89	0.240 13	2.394 00	11.554 20	29.664 38	1.720 39
1 254	1.29	0.517 71	0.658 89	0.237 66	2.402 51	13.111 18	29.497 00	1.714 63
1 390	1.28	0.510 86	0.661 88	0.233 02	2.412 35	10.840 32	29.737 12	1.722 91
1 506	1.29	0.492 57	0.669 98	0.228 20	2.407 45	13.516 15	29.451 32	1.713 06
1 616	1.28	0.507 43	0.663 38	0.244 38	2.404 89	10.950 26	29.726 06	1.722 53
1 750	1.30	0.493 71	0.669 47	0.251 24	2.404 02	4.968 73	30.259 38	1.741 14
1 820	1.27	0.440 00	0.694 44	0.249 33	2.393 29	8.197 24	29.987 44	1.731 61

表 2 实钻反演结果

Table 2 Inversion results from actual drilling data

地层	最大构造	最小构造	孔隙压力	
	应力系数 ξ_1	应力系数 ξ_2	$/(10^{-2}\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	
侏罗系	上沙庙组	0.48	0.05	1.15
	下沙庙组	0.42	0.05	1.38
	千佛崖组	0.37	0.04	1.27
	自流井组	0.33	0.05	1.29
三叠系	须家河	0.30	0.05	1.25
	雷口坡组	0.37	0.04	1.44
	嘉陵江组	0.36	0.05	2.06
	飞仙关组	0.35	0.06	2.20
二叠系	上统	0.33	0.08	2.21
	茅口组	0.35	0.07	1.93
	栖霞组			
	梁山组	0.34	0.05	1.95
石炭系	黄龙组	0.30	0.07	2.17
志留系	龙马溪组	0.30	0.06	2.15

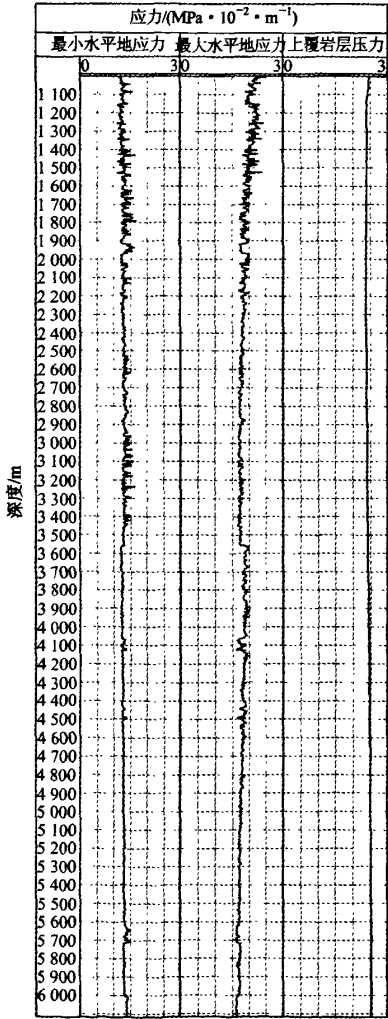


图 3 地应力梯度剖面

Fig.3 In-situ stress gradient profile

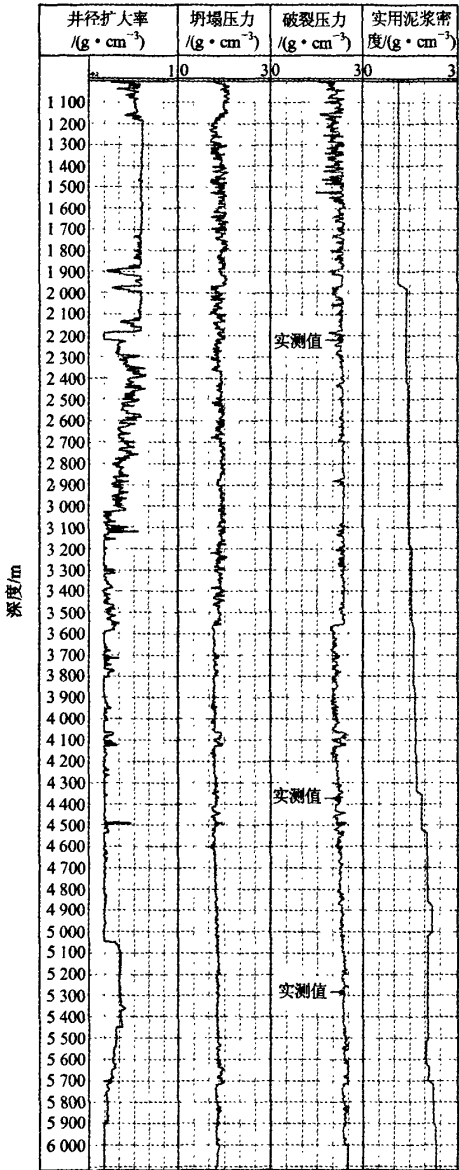


图 4 坍塌压力及破裂压力当量密度剖面

Fig.4 Collapse pressure and fracture pressure equivalent density profile

4 结 论

本文基于双重介质弹性力学得到井眼变形程度与岩石物理力学性质、地应力、孔隙压力及钻井液密度的关系,在此基础上由钻井液录井和常规测井,反算出地应力及孔隙压力,并进一步计算井壁坍塌压力和破裂压力,得到如下结论:

- (1) 井眼的变形程度与地应力及孔隙压力密切

相关,从井眼变形出发进行地应力的反问题求解是完全可行的。

(2) 井眼钻开后若发生井眼失稳或垮塌,井壁应力分布宜采用本文介绍的椭圆孔应力分布,而不能再使用井眼为理想圆筒的假设。

(3) 本文介绍的理论是针对直井而言的,反演的结果也只包含地层压力和地应力数值,不能得到地应力的方位。如果对定向井、水平井进行类似的随钻反演研究,因为坍塌压力与井斜角及井斜方位有关,可以同时反演出地应力大小及其方位。

参考文献(References):

- [1] 陈勉,金衍,张广清.石油工程岩石力学[M].北京:科学出版社,2008.(CHEN Mian, JIN Yan, ZHANG Guangqing. Petroleum related rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2008.(in Chinese))
- [2] ZOBACK M D, BARTON C A, BRUDY M. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(10): 1 049 - 1 076.
- [3] 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): 2 355 - 2 358.(SHI Lin, ZHANG Xudong, JIN Yan, et al. New method for measurement of in-situ stress at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2 355 - 2 358.(in Chinese))
- [4] 金衍,陈勉,郭凯俊,等.复杂泥页岩地层地应力的确定方法研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(11): 2 287 - 2 291.(JIN Yan, CHEN Mian, GUO Kaijun, 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): 2 287 - 2 291.(in Chinese))
- [5] 张广清,陈勉,赵振峰. Kaiser 取样偏差对深层油藏地应力测试的影响分析[J].岩石力学与工程学报,2008,27(8): 1 682 - 1 687.(ZHANG Guangqing, CHEN Mian, ZHAO Zhenfeng. Research on influence of Kaiser sampling deviation on stress measurements at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1 682 - 1 687.(in Chinese))
- [6] LAVROV A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(2): 151 - 171.
- [7] 侯明勋,葛修润,王水林.水力压裂法地应力测量中的几个问题[J].岩土力学,2003,24(5): 840 - 844.(HOU Mingxun, GE Xiurun, WANG Shuilin. Discussion on application of hydraulic fracturing method to geostress measurement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5): 840 - 844.(in Chinese))
- [8] SUNG O C. A decade's hydro fracturing experiences of in-situ stress measurement for tunnel construction in Korea[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2 200 - 2 206.
- [9] RUTQVIST J, CHIN F U T, STEPHANSSON O. Uncertainty in maximum principal stress estimated from hydraulic fracturing measurements due to the presence of the induced fracture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(1 - 2): 107 - 120.
- [10] ITO T, EVANS K, KAWAI K, et al. Hydraulic fracture reopening pressure and the estimation of maximum horizontal stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(6): 811 - 826.
- [11] BRUDY M, ZOBACK M D, FUCHS K, et al. Baumgartner. Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: implications for crustal strength[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B8): 18 453 - 18 475.
- [12] HUDSON J A, CORNET F H, CHRISTIANSSON R. ISRM suggested method for rock stress estimation—part I: strategy for rock stress estimation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(7/8): 991 - 998.
- [13] FJAER E, HOLT R M, HORSRUD P. Petroleum related rock mechanics[M]. Amsterdam: Elsevier Press, 1992.
- [14] 曾联波,王贵文.塔里木盆地库车山前构造带地应力分布特征[J].石油勘探与开发,2005,32(3): 59 - 60.(ZENG Lianbo, WANG Guiwen. Distribution of earth stress in Kuche thrust belt, Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(3): 59 - 60.(in Chinese))
- [15] 黄继新,彭仕宓,王小军,等.成像测井资料在裂缝和地应力研究中的应用[J].石油学报,2006,27(6): 65 - 69.(HUANG Jixin, PENG Shimi, WANG Xiaojun, et al. Applications of imaging logging data in the research of fracture and ground stress[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(6): 65 - 69.(in Chinese))
- [16] 吴超,陈勉,金衍.基于地震属性技术的井壁稳定随钻预测新方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2007,31(6): 141 - 146.(WU Chao, CHEN Mian, JIN Yan. A new method of predicting borehole stability while drilling based on seismic attribute technology[J]. Journal of China University of Petroleum(Natural Science), 2007, 31(6): 141 - 146.(in Chinese))