

川东北元坝地区元坝 11 井地应力建模和井壁稳定性分析

秦黎明, 李永杰, 吴海燕, 张元春, 李三国, 谢关宝

中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101

摘要 川东北元坝地区由于地质条件复杂, 多次发生井漏、坍塌、溢流等复杂井况与事故, 严重影响施工周期。本文利用 GMI 井壁稳定性软件, 依据元坝 11 井钻井、测井及地质资料, 计算了元坝 11 井的岩石力学参数, 并依据岩石力学实验数据, 实现了杨氏模量及泊松比的动静态转化。进一步, 利用压裂资料及井眼崩落法则约束最小、最大主应力, 计算了最大、最小主应力。建立了元坝 11 井的孔隙压力、坍塌压力及破裂压力三压力剖面, 预测了泥浆密度窗口, 分析了元坝 11 井的井壁稳定性。结果表明, 元坝地区陆相地层自下沙溪庙组至须家河组坍塌压力变化较大, 导致泥浆密度窗口缩小, 并且钻井过程中选取泥浆密度不合适, 地层多为砂泥岩薄互层, 导致层段多次发生复杂情况, 井眼扩径明显; 海相地层变化相对较小, 泥浆密度窗口较大, 井壁相对稳定。

关键词 地应力建模; 三压力; 井壁稳定性; 元坝 11 井

中图分类号 P613.8

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.34.008

Stress Modeling and Well Stability of Well Yuanba 11 in Yuanba Area in Northeastern Sichuan Basin

QIN Liming, LI Yongjie, WU Haiyan, ZHANG Yuanchun, LI Sanguo, XIE Guanbao

Research Institute of Petroleum Engineering, Sinopec, Beijing 100101, China

Abstract In Yuanba area of northwestern Sichuan Basin, due to complex geological conditions, many complicated downhole accidents occur, such as the well leakage, the borehole collapse and the overflow, which would affect the drilling schedules. Using the GMI well stability software, based on the drilling data, the well logging and the geological information in Well Yuanba 11, the mechanical parameters were calculated. Combined with the experiment data, the Young's modulus and Poisson's ratio were converted from dynamic values to static ones. In addition, the minimum and the maximum horizontal stresses were constrained and computed by the fracture information and the wellbore breakout method. Based on above results, the three pressure section, the well stability analysis and the mud scope were investigated, to provide a basis for the drilling design. The results indicate that in Jianmenguan Formation of terrestrial layer, the strata is characterized by fractures and well water permeability, where the fluid would easily be lost. Then in the air drilling section, due to the high and variable collapse pressure, the air drilling is not suitable. After the routine drilling replaces the air drilling, the mud density is lower and near to the pore pressure and the collapse pressure, which would lead to unstable borehole. So, many complicated downhole accidents would occur. While drilling in the depth of 4000m, the mud density is increased so that the complicated situations are mitigated. But in Xujiahe Formation, owing to the low mud density, the pore pressure is so high that the overflow would occur. In the marine section, the mud weight is higher, and actually, the formation pressure is lower. Therefore, the plastic flow of the salt layer would occur and sometimes the stickings may occur, which are distributed in Jialijiang Formation and Changxin Formation.

Keywords stress modeling; three pressures; well stability; Well Yuanba 11

0 引言

20 世纪 70 年代, 斯伦贝谢公司首先将测井解释与岩石

力学相结合, 推出了 MSL 井壁稳定性测井评价软件, 然而在当时测井数据信息量小, 获得的岩石力学参数较少^[1]。80 年代

收稿日期: 2012-08-08; 修回日期: 2012-09-26

基金项目: 中石化科技部重点攻关项目(P10042)

作者简介: 秦黎明, 博士, 研究方向为非常规测录井, 电子信箱: qinliming2006@126.com

之后,测井仪器开始迈向高新技术群体,尤其是成像测井技术和阵列声波仪器的发展,使得采集的声波信息更加丰富,可以提供纵波、横波及斯通利波资料,判断最大主应力方位及各向异性,同时岩石力学参数的计算也更为精确,然而此时软件的发展相对缓慢^[2]。2000年之后,斯坦福大学推出了GMI井壁稳定性软件,融合了测井学与石油工程,并且采用了力学与物理化学耦合的一些方法,将岩石力学与井壁稳定性的研究推向了一个新高度^[3]。

元坝区块位于四川盆地东北部,构造上位于九龙山背斜与通南巴背斜带的南侧,属于元坝低缓构造带北部,发育二叠系、三叠系、侏罗系及白垩系,海陆相地层均有分布,以上三叠统以须家河组底部为界,以上为陆相地层,以下为海相地层。陆相地层以砂泥岩岩性为主,局部发育砾岩及煤层,具有互层、胶结致密、硬度大及耐磨性强的特征;海相地层发育盐膏层、灰岩及白云岩,地层可钻性相对陆相比较好,但局部盐

膏层厚度大,塑性流动强,可钻性也不好^[4-6]。整体而言,元坝地区由于地质条件复杂,多次发生井漏、坍塌、溢流等复杂情况与事故,严重影响施工周期,推高了建设成本。本文以元坝11井为例,结合岩石力学模型^[7-13],通过地应力建模,建立三压力剖面,预测泥浆密度窗口,并且与实际钻井结果进行对比,为后期的钻井设计提供依据。

1 岩石力学模型建立

收集元坝11井的钻井属性、井身结构、地层测试、常规测井(声波、密度、中子、伽马、井径、自然电位、深浅电阻率等)和地层分层及泥浆密度等相关数据,并依据斯坦福大学编制的GMI软件建立了元坝11井的地应力及三压力模型。在实验室采用三轴力学岩石实验建立了岩石力学参数杨氏模量与泊松比的动静态转换关系(见图1给出的陆相、海相地层的动、静态转换模型结果),关系如下:

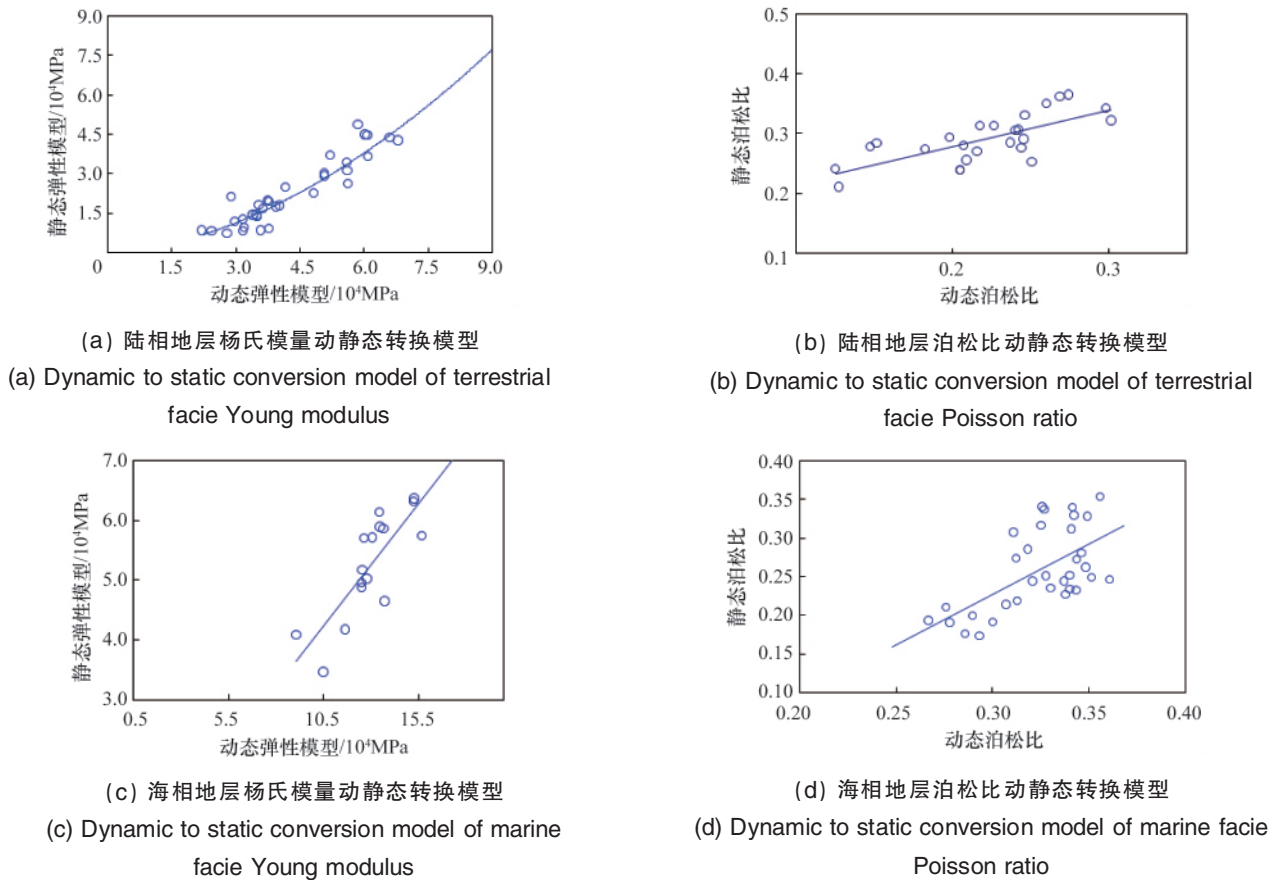


图1 元坝地区岩石力学参数动静态转化

Fig. 1 Rock mechanical parameter conversion in Yuanba area

陆相地层

$$E_s = 0.0028E_d^{1.4924} \quad R^2 = 0.8012 \quad (1)$$

$$\mu_s = 0.5927\mu_d + 0.1513 \quad R^2 = 0.5676 \quad (2)$$

海相地层

$$E_s = 0.3811E_d + 2522.1 \quad R^2 = 0.6609 \quad (3)$$

$$\mu_s = 1.302\mu_d - 0.163 \quad R^2 = 0.672 \quad (4)$$

式中, E_d 为动态杨氏模量, MPa; E_s 为静态杨氏模量, MPa; μ_s 为静态泊松比, 无量纲; μ_d 为动态泊松比, 无量纲。

1.1 井眼崩落方位分析

利用地层倾角数据分析井壁崩落,可获得井眼崩落宽度与方位,但是要将键槽(井壁侧面由于管柱摩擦形成的槽)与冲刷(整个井眼范围内出现的井径扩大)情况排除。井眼崩落分析结果表明(图 2),陆相地层井眼崩落发生较多,主要分布在 3 个层段,即遂宁组、蓬莱镇组 and 上沙溪庙组,深度段分别

为 400—1200m、1800—2000m 和 4500—4800m,崩落方位自上而下略有差别,自北东向逐渐变为近南北向,表明最大主应力方向也由北西向逐渐转变为近东西向,海相地层井径仅在约 6700m 有变化。结合 6524.6—7000m 成像资料(图 2(c))可知,该地层为飞仙关组与长兴组地层。海相碳酸盐地层的

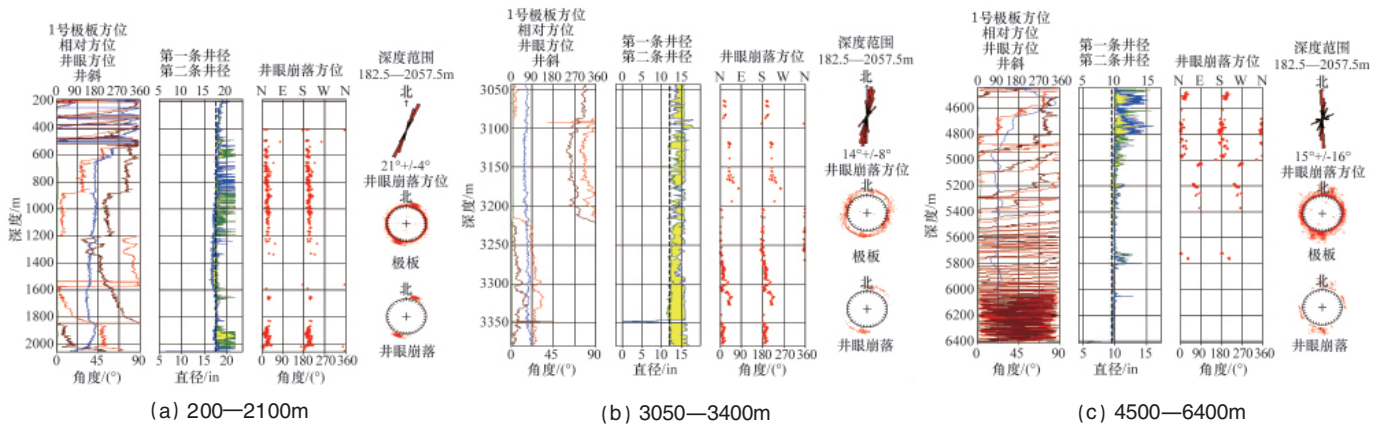


图 2 井径曲线确定的井眼崩落
Fig. 2 Borehole breakout defined by caliper curve

裂缝不发育,局部分布井眼崩落,井眼崩落的方位约在 30°,崩落的宽度约在 45°,最大主应力方位为北西南东向。

1.2 最大主应力约束

最大主应力的确定相对复杂,Haimson 与 Fairhurst^[14]提出了直井裸眼水力压裂技术,以确定最大主应力的方向和大小,后期许多成功的应力测量也一直沿用此项技术。Anderson 等^[15]提出了 S_v (上覆岩层压力)、 S_{Hmax} (最大水平主应力)、 S_{Hmin} (最小水平主应力)三者之间的关系,描述了 3 种应力状态。Barton 与 Zoback^[16]认为,当应力集中超过岩石强度,井壁围岩发生崩落,初始崩落形成之后,应力可使崩落区域不断加深,但崩落宽度始终保持稳定,基于这一理论提出了下列应力多边形判别法则以确定最大主应力:

$$S_{Hmax} = \frac{(C_o + 2P_p + \Delta P + \delta \Delta T) - S_{Hmin}(1 + 2\cos 2\theta)}{1 - 2\cos 2\theta} \quad (5)$$

式中, $2\theta_p = \pi - W_{BO}$, W_{BO} 为井眼崩落宽度; P_p 为孔隙压力, MPa/100m; ΔP 为泥浆密度-孔隙压力, g/cm³; S_{Hmax} 为最大主应力, MPa/100m; ΔT 为温度, °C; δ 为上覆应力; S_{Hmin} 为最小主应力, MPa/100m。

通过最小水平主应力值(由现场压裂数据可得)及模型计算的抗压强度 C_o 与抗拉强度 T_o 约束最大水平主应力值,并将一个地区划分为正断层、逆断层及走滑断层 3 种应力状态,形成应力三角形图版约束最大主应力值,并且分析井眼崩落的应力特征。图 3(a)为 2000m 深度的应力三角形图版,此深度段处于 $S_{Hmax} > S_v > S_{Hmin}$,为走滑应力状态下的井壁剪切而引起的井眼崩落,而图 3(b)为 4500m 深度段应力状态,同样 $S_{Hmax} > S_v > S_{Hmin}$,然而此时并没有发生井眼崩落。在此基础上利用孔隙压力与上覆应力采用反算法计算最大、最小水平主应

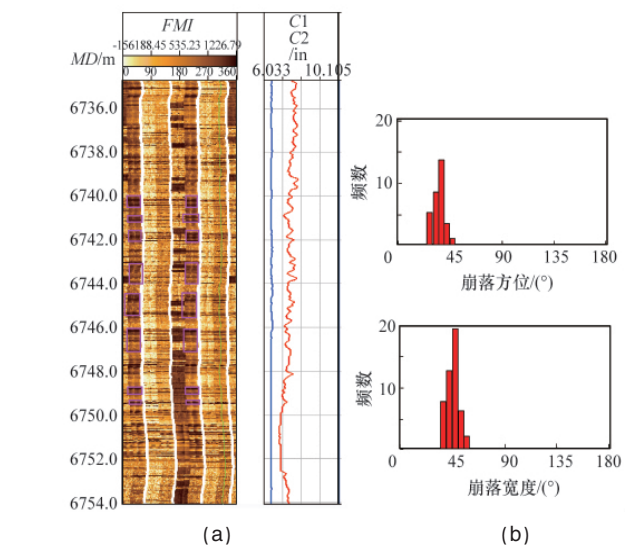


图 3 成像资料确定的井眼崩落宽度与方位
Fig. 3 Scope and azimuth of breakouts defined by imaging information

力的公式为

$$K_1 = (S_{Hmax} - P_p) / (S_v - P_p) \quad (6)$$

$$K_2 = (S_{Hmin} - P_p) / (S_v - P_p) \quad (7)$$

式中, S_v 为上覆压力, MPa/100m; K_1 、 K_2 分别为最大主应力与最小主应力反算法有效比值。

1.3 孔隙压力与破裂压力模型

利用声波、密度和电阻率过滤曲线,建立正常的压实趋势线,陆相地层采用等效深度法,海相地层采用有效应力法。通过声波、密度和电阻率过滤曲线计算孔隙压力值,在此基

础之上,依据部分实测的地层压力数据,建立合成孔隙压力趋势线,从而确定地层的孔隙压力梯度曲线。模型表明,元坝

11 井孔隙压力梯度随着深度增加陆相地层明显高于海相地层,其中须家河组地层的孔隙压力存在异常,明显高于其余

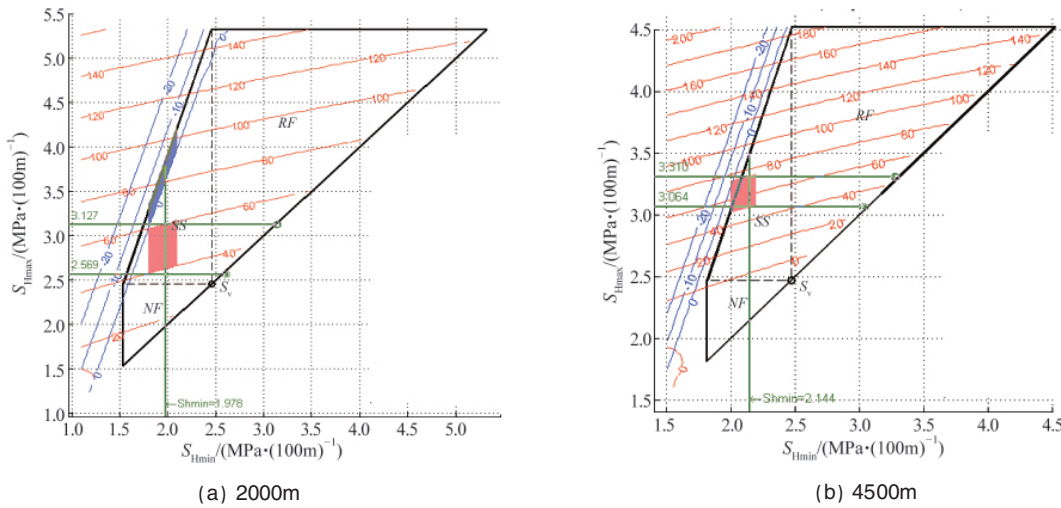


图 4 不同应力状态时的最大主应力约束

Fig. 4 Maximum horizontal stress constrained under different stress states

地层,见图 4。岩石破裂压力的计算模型较多,文中采用了 Mathews-Kelley 模型、Hubert-Willis 模型与 Eaton 模型,坍塌压力采用模型:

$$\rho_{mc} = \frac{(3S_{Hmax} - S_{Hmin}) - 2CK + \alpha P_p (K^2 - 1)}{(K^2 + 1) \cdot H} \times 100 \quad (8)$$

式中, C 为岩石内聚力,MPa; $K = \cot(45 - \phi/2)$,无量纲; ρ_{mc} 为坍塌压力当量密度, g/cm^3 ; α 为毕奥特系数,无量纲; H 为地层深度, m 。

2 井壁稳定性分析

利用上述应力模型和岩石力学参数,计算地层的坍塌压力。根据泥浆密度窗口选取原则,取孔隙压力与最小应力值

形成区间值,确定泥浆密度的窗口,见图 5 绿色区域。从元坝 11 井预测泥浆密度来看,陆相地层自 2200m 以下至 5000m,从沙溪庙组开始地层的坍塌压力变化大,直到须家河组底部。因此,在实际的钻井过程中钻井密度选取得不合适必然会发生复杂情况。海相地层的泥浆密度窗口相对较大,并且坍塌压力变化小,发生复杂情况的可能性小。利用实际的钻井液密度,结合计算的岩石力学参数与三压力预测井眼崩落的方位,并且与成像资料或井径资料对比,可检验模型的正确性。元坝 11 井成像资料较少,仅在 6529—7000m 飞仙关组与长兴组地层有成像资料,局部层段只能通过井径资料来对比。由于 3298m 以上为空气钻,无法验证,仅从 3298m 以下地层预测的井眼崩落资料分析表明(图 6),元坝 11 井井眼崩落

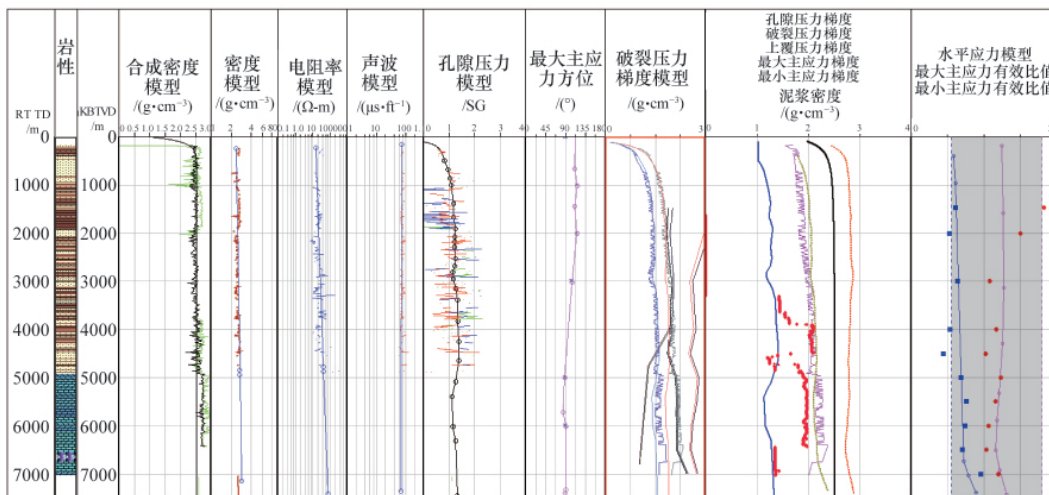


图 5 三压力和地应力建模

Fig. 5 Three pressures and geo-stress modeling

区域发生轻微的井眼崩落,井径上也有变化,但不是很明显,然而在钻探过程初期使用泥浆密度过高,实际上海相地层的压力不高,从而造成盐膏层的塑性流动,之后调整泥浆密度,井壁稳定,仅在嘉陵江组与长兴组盐膏层各发生1次卡钻吸附。

4 结论

本文以元坝11井为例,结合岩石力学模型^[7-13],通过地应力建模,建立三压力剖面,预测泥浆密度窗口,并且与实际钻井分析资料进行了分析对比,为后期的钻井设计提供依据。主要结论如下。

(1) 利用常规测井资料,结合三轴岩石力学实验,实现了岩石力学参数的动静态转化,相关性系数 R^2 最高达到0.80以上;采用最大主应力约束法则,结合实测应力值,采用反算法,计算了最大、最小水平主应力。

(2) 充分利用声波、电阻率及密度曲线资料重构模型,采用曲线交互,结合常规三压力的计算模型,实现了三压力剖面的建立,预测了泥浆密度窗口。

(3) 元坝地区陆相地层自下沙溪庙组至须家河组坍塌压力变化较大,导致泥浆密度窗口缩小,并且在钻井过程中选取泥浆密度不合适,地层多为砂泥岩薄互层,导致层段多次发生复杂情况,井眼扩径明显,而海相地层变化相对较小,泥浆密度窗口较大,井壁相对稳定。

参考文献 (References)

- [1] 刘向君,罗平亚.石油测井与井壁稳定[M].北京:石油工业出版社,1999.
Liu Xiangjun, Luo Pingya. Petroleum well logging and well stability[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [2] 楼一珊,金业权.岩石力学与石油工程[M].北京:石油工业出版社,2006.
Lou Yishan, Jin Yequan. Rock mechanics and petroleum engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [3] Zoback M D. Reservoir geomechanics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [4] 陈明,窦玉玲,李文飞,等.川东北元坝区块井身结构优化设计[J].天

然气技术,2010,4(3):44-47.

- Chen Ming, Dou Yuling, Li Wenfei, et al. *Natural Gas Technology*, 2010, 4(3): 44-47.
- [5] 王俊涛,杨景利.川东北地区泡沫钻井井壁稳定技术[J].钻井液与完井液,2011,28(1):5-7.
Wang Juntao, Yang Jingli. *Drilling Fluid and Completion Fluid*, 2011, 28(1): 5-7.
- [6] 兰凯,熊友明,闫光庆,等.川东北水平井储层井壁稳定性及其对完井方式的影响[J].吉林大学学报:地球科学版,2011,41(4):1233-1238.
Lan Kai, Xiong Youming, Yan Guangqing, et al. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2011, 41(4): 1233-1238.
- [7] Holcomb D J. General theory of the Kaiser effect[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 1993, 30(7): 929-935.
- [8] Brudy M, Zoback M D, Fuchs K, et al. Estimation of the complete stress tensor to 8km depth in the KTB scientific drill holes: implications for crustal strength[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B8): 18, 453-18, 475.
- [9] Hornby B E. Imaging near-borehole of formation structure using full-waveform sonic data[J]. *Geophysics*, 1989, 54(6): 747-757.
- [10] Hottman C E, Johnson R K. Estimation of formation pressures from Log-derived shale properties[J]. *JPT*, 1965, 17(6): 717-722.
- [11] 秦绪英,陈有明,陆黄生.井中应力场的计算及其应用研究[J].石油物探,2003,42(2):271-275.
Qin Xuying, Chen Youming, Lu Huangsheng. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2003, 42(2): 271-275.
- [12] 路保平,张传进,鲍洪志.利用多测井参考数求取岩石可钻性[J].石油钻探技术,1998,26(3):42-61.
Lu Baoping, Zhang Chuanjin, Bao Hongzhi. *Petroleum Drilling Techniques*, 1998, 26(3): 42-61.
- [13] Zoback M D, Apel R, Baumgärtner J, et al. Upper-crustal strength inferred from stress measurements to 6km depth in the KTB borehole[J]. *Nature*, 1993, 365(6447): 633-635.
- [14] Haimson B C, Fairhurst C. In-situ stress determination at great depth by means of hydraulic fracturing [C]//11th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS), Berkeley, CA, USA, June 16-19, 1969: 559-584.
- [15] Anderson E M. The dynamics of faulting and dyke formation with application to Britain[M]. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1951.
- [16] Barton C A, Zoback M D. In situ stress orientation and magnitude at the Fenton Geothermal site, New Mexico, determined from wellbore breakouts[J]. *Geophysical Research Letters*, 1988, 15(5): 467-470.

(责任编辑 马宇红,朱宇)

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。