

定向井井壁稳定性随钻预测

豆宁辉¹, 吴超¹, 陈勉²

1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101
2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

摘要 随着勘探开发地质环境日益复杂, 特殊工艺井数量直线上升, 随之而来的井壁稳定性问题引起了广泛关注。本文基于地质统计分析基础, 提出了随钻预测定向井井壁稳定性分析方法。通过分析已钻井的地震、测井资料, 采用地质统计中配置协同克里金以及序贯高斯模拟相结合的方法, 预测出整个区块的三维岩石力学参数数据体, 根据待钻井的轨迹, 提取井眼轨迹处的岩石力学参数值, 通过定向井坍塌、破裂和孔隙压力模型, 建立相应的分层岩石力学预测模型, 减少发生井壁失稳的可能性, 同时可以和随钻测井资料对比预测结果的准确性, 提高预测精度。

关键词 定向井; 随钻预测; 井壁稳定性; 地质统计

中图分类号 TE242

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.28.008

Prediction of Borehole Stability During Drilling of Directional Wells

DOU Ninghui¹, WU Chao¹, CHEN Mian²

1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China
2. Petroleum Engineering College, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract In recent years, with the increasing complexity of the exploration and development geological environment, the number of complex wells increases, and subsequently, the borehole stability becomes more and more an issue. This paper proposes a method to predict the borehole stability during drilling of directional wells based on a geological statistical analysis. Firstly, the seismic and logging data of drilled wells are analyzed, and then through the geostatistical collocated co-Kriging simulation combined with the sequential Gaussian simulation, the 3D data body of rock mechanics parameters for the whole block are predicted. According to the trajectory to be drilled, the parameters of rock mechanics for the wellbore trajectory are extracted and by using the models for collapse, fracture and pore pressure of the directional well, the prediction model for the corresponding stratified rock mechanics is built. The accuracy of the prediction can be evaluated in comparison with the logging data and by adjusting the parameters of the model, the model can be updated and refined to improve the prediction accuracy.

Keywords directional well; predicting while drilling; borehole stability; geostatistics

0 引言

近年来, 随着石油勘探开发的进行, 大斜度井、大位移井、水平井及分支井等复杂井开始逐渐增加, 井斜角和方位角对斜井的井壁稳定性有显著影响, 随之相关的井壁失稳情况也频频出现。一般对于直井而言, 钻井过程中出现的喷、漏、塌、卡等井壁失稳问题, 目前主要是从井壁的张性破裂和剪切破坏角度考虑, 传统的方法是利用岩石力学理论分析井壁稳定性, 主要从岩石力学参数计算; 原地应力分析; 井壁稳定力学建模 3 方面入手。

其中发展最快的是核磁共振随钻测井 (Magnetic Resonance Imaging Logging While Drilling, MRILWD), 目前这套系统可以在 150℃ 及 137.89MPa 条件下工作, 对岩性复杂或未知的地层有很大用处, 它也可以提供流体及渗透率的参数, 最大的优点在于其实时性。MRILWD 技术优势在于进行钻井利用地质导向时, 可以通过分析渗透率最佳路径得到相关结果。

1999 年, 金衍等^[1]对定向井的井壁稳定模型提出改进, 解决了定向井和直井间的坐标转换等问题; 2004 年, 李军等^[2]利

收稿日期: 2011-08-24; 修回日期: 2011-09-22

基金项目: 国家重大科技专项 (2011ZX05031-004-001)

作者简介: 豆宁辉, 助理工程师, 研究方向为定向井与水平井工艺技术及井壁稳定, 电子信箱: dounh@sripec.cn

用有限元建立了定向井井壁稳定性三维模型,直观地反应了定向井井壁稳定性,推进了定向井井壁稳定性研究的进展;随后金衍等开始研究钻前预测井壁稳定性的方法,通过将地震资料与岩石力学相结合,提出了利用地震资料钻前预测井壁稳定性的方法,这种方法被多次用于油田钻井过程中,解决了以前深井钻前安全泥浆密度预测的难题。

传统方法的特点和不足之处主要在于:(1)由于现场地震资料不全面,加之与岩石力学参数之间关系的不确定性,导致通过地震资料钻前预测井壁稳定性的适用性不强;(2)由于目前地震属性多用于定性评价,如何将其用于钻进过程中的随钻预测,确定井壁稳定性是个值得研究的课题;(3)目前钻井施工中所用的MWD (Measure While Drilling)、LWD (Logging While Drilling)等随钻仪器的应用较广,但增加了钻井成本。

1 利用地质统计分析确定岩石力学参数

随钻预测井壁稳定性的方法很多,主要有地震反演方法、地震属性技术、地质统计分析等。其中地震反演主要将岩石力学与地震反演原理相结合,通过约束稀疏脉冲反演、多参数反演以及宽带约束反演等确定岩石力学参数,同时结合岩屑录井信息,通过神经网络建模预测井壁稳定性。而地震属性首先是建立地震属性和测井资料间的非线性关系,对地震属性优化后,利用神经网络建立地震属性与测井数据间的分层映射关系模型,实时预测待钻地层的声波和密度,有效控制安全泥浆密度。这两种方法尽管在油田实际应用中都可,但是由于地震反演和地震属性技术所用时间较长,相对于随钻有一定滞后,不能及时预测待钻地层的钻井液密度,而地质统计分析则是根据测井数据和地震资料的空间相关性,利用单井的岩石力学参数剖面,利用协同克里金与序贯高斯模拟相结合的方法准确预测出整个区块的岩石力学参数,分层建立相应的坍塌压力、破裂压力模型,根据岩屑录井资料,准确找出合理的地层,运用相关的模型,实时预测待钻地层的钻井液密度,指导正常钻井^[4-6]。

1.1 单井岩石力学参数预测

首先根据测井资料得到已钻井的声波速度和密度,通过以下公式计算单井岩石力学参数,然后确定单井的三压力剖面。由于单井数据有限,所以本文主要侧重于利用地质统计方法模拟整个区块的岩石力学参数数据体。

根据测井资料得到的纵波速度,通过纵横波转换模型,即

$$v_s = 1.8934 \ln(-0.4346 + 0.3544 v_p) + 2.3587 \quad (1)$$

其中, v_p 为纵波速度, v_s 为横波速度。

(1) 杨氏模量和泊松比

假设岩石为各向同性无限弹性体,动态弹性模量 E_d 和泊松比 μ_d 与纵波速度 v_p 和横波速度 v_s 之间的关系如下:

$$\begin{aligned} E_d &= \rho v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2) / (v_p^2 - v_s^2) \\ \mu_d &= (v_p^2 - 2v_s^2) / 2(v_p^2 - v_s^2) \end{aligned} \quad (2)$$

根据室内实验,岩石力学动、静态参数之间转换关系式为

$$\begin{aligned} \mu_s &= A_1 + B_1 \mu_d \\ E_s &= A_2 + B_2 \mu_d \end{aligned} \quad (3)$$

其中, μ_s 为静态泊松比; E_s 为静态弹性模量; A_1, B_1, A_2, B_2 为转换系数,与岩性和岩石所受应力有关。根据经验关系式选取这些参数合适的值。

(2) 黏聚力

根据已知动态弹性模量 E_d 和泊松比 μ_d 与纵波速度 v_p 和横波速度 v_s 的关系式,得到黏聚力为:

$$C = A(1 - 2\mu_d) \left(\frac{1 + \mu_d}{1 - \mu_d} \right)^2 \rho^2 v_p^4 (1 + 0.78 V_{sh}) \quad (4)$$

其中, A 为与岩石性质有关的常数; V_{sh} 为泥质含量。

(3) 内摩擦角

根据岩石的内摩擦角 φ 与黏聚力 C 的关系式为

$$\varphi = a \cdot \lg \left[M + (M^2 + 1)^{\frac{1}{2}} \right] + b \quad (5)$$

其中, $M = a_1 - b_1 \cdot C$; a, b, a_1, b_1 为与岩石有关的常数。

(4) 抗拉强度

岩石的抗拉强度 S_t 表示当岩石遇到拉伸时破坏时的强度,可表示为

$$S_t = \frac{0.0045 E_d (1 - V_{sh}) + 0.008 E_d V_{sh}}{k} \quad (6)$$

其中, k 为常数。

(5) 地应力

地应力是计算三压力剖面的基础,本文主要采用七五模式进行计算,根据得到的杨氏模量和泊松比等,代入式(7)一式(9)就可以得到地应力的大小。

$$\sigma_z = \int_0^H \rho g dh \quad (7)$$

$$\sigma_H = \frac{1}{2} \left[\frac{\xi_1 E_s}{1 - \nu_s} + \frac{2 \nu_s (\sigma_z - \alpha p_0)}{1 - \nu_s} + \frac{\xi_2 E_s}{1 + \nu_s} \right] + \alpha p_p \quad (8)$$

$$\sigma_h = \frac{1}{2} \left[\frac{\xi_1 E_s}{1 - \nu_s} + \frac{2 \nu_s (\sigma_z - \alpha p_0)}{1 - \nu_s} - \frac{\xi_2 E_s}{1 + \nu_s} \right] + \alpha p_p \quad (9)$$

其中, σ_z 为上覆地层压力; σ_H, σ_h 为最大和最小水平地应力; $\varepsilon_H, \varepsilon_h$ 为水平构造应力系数。

1.2 利用序贯高斯模拟预测岩石力学参数

序贯高斯模拟是一种条件模拟,首先将已知数据作为条件数据,并要求其为正态分布,而地震数据是非对称的高斯分布,所以必须将地震数据在处理前转换成正态分布,沿着随机路径,求出井筒内每个数据点处的条件分布函数值,得到相应模拟值。模拟完成后需要将数据转换为区域化变量。

序贯高斯模拟的过程可表示为 n 次模拟过程

$$\begin{aligned} Z_1 &\propto P[Z_1 \leq z_1(m)] \\ Z_2 &\propto P[Z_2 \leq z_2(m+1)] \\ &\vdots \\ Z_n &\propto P[Z_n \leq z_n(m+n-1)] \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ 是等待模拟的变量; $z_1, z_2, \dots, z_n$ 为条件分布函数值; m 为整个数据点个数。计算了 n 次条件累积分布函数(Conditional Cumulative Distribution Function, CCDF)。

本文采用序贯高斯模拟方法预测岩石力学参数,其优点在于:具有良好的直观性,且算法比较简单可行;在求取CCDF过程中,可以将邻近区域的间接信息作为条件,比较快速地得到条件累积分布。通过高斯模拟得到的累积条件分布函数的均值等于克里金估计值,同时克里金估计方差就等于条件方差,于是有

$$P[Z_0|Z_s] \propto \exp\left[-\frac{(Z_0 - m_k)^2}{2\sigma_k^2}\right] \quad (11)$$

其中, $P[Z_0|Z_s]$ 表示 Z_0 的条件分布, m_k 和 σ_k^2 为均值和方差。

1.3 区块地应力预测

地应力是岩石力学的基础,本文采用序贯高斯模拟,利用现有的地应力数据对整个地应力场进行模拟,得到整个区块的地应力数据体。地应力模拟时,首先需要进行参数转换,本文所用的地应力计算模型是黄荣樽等的七五模式^[3]。

首先利用随机模拟原理建模,根据序贯高斯模拟方法网格化后进行计算,分析统计地震资料,将已知地应力数据点与地震道数据相结合得到变差函数。在随机方向上求出变程,利用克里金方法解出变差函数,后循环以上步骤,在相应的地震数据点上合成新的地震数据,对比两个地震数据,得到误差。分析结果是否达到所设精度,如果达到精度要求就应用新的地震数据;如果未达到要求,将需要细化网格,继续上面的计算方法。这样确保每个区域数据都是根据序贯模拟得到的,一般情况下地层波阻抗作为基础变量^[6-9]。

地应力是分析井壁稳定的重要参数,所以本文基于此参数进行预测。首先根据地质统计基本原则,找出波阻抗和地应力之间的相关性,通过协方差函数求出权系数。根据权系数对这两个资料进行相互转换,通过序贯高斯模拟及配置协同克里金方法计算出相应的地应力数据体。

反射系数计算公式为

$$R_i = \frac{\rho_{is}\psi_{i+1} - \rho_{is}\psi_i}{\rho_{is}\psi_{i+1} + \rho_{is}\psi_i} \quad (12)$$

其中, ρ_{is} 为波阻抗; i 为地层反射界面数。

以上即模拟的全过程,然后选取模拟后的地震道中最好的节点值作为地应力值,后对整个区块中剩下的地震道进行模拟,得到所需的地应力数据体。鉴于其余岩石力学参数结果都是单井剖面,所以模拟过程类似于地应力预测方法,进而得到区域岩石力学参数数据体^[10-12]。

1.4 岩石力学参数预测实例

图1为T区块已钻井Y1井的岩石力学参数计算结果。

图2表示一个地震层位,如图所示,为一个凸起构造带,两边深度较大,而中间深度较浅,所以时间值较小。

图3是T区块的地层框架图,从上至下分为6个重要层位,中间5个地层分布。其中图4中黄线表示了X1井的井眼轨迹在T区块泊松比预测模型中的投影,根据井眼轨迹,提

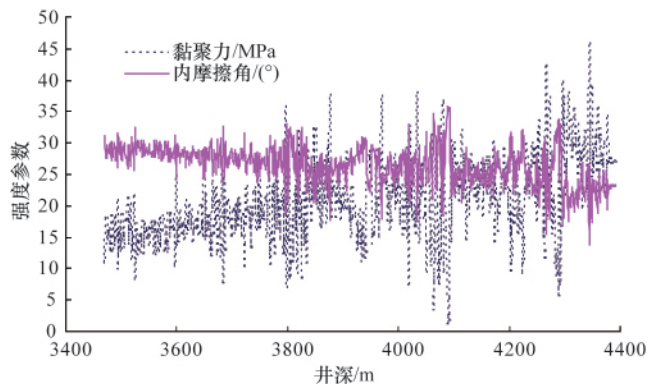


图1 Y1井地层内摩擦角和黏聚力剖面

Fig. 1 Internal friction angle and cohesive profile of well Y1

取相关岩石力学参数,这些参数模型均是通过钻后的参数分层合成的,在随钻过程中,只需根据岩屑录井资料,判断钻达什么地层,然后选用合适的模型预测待钻200m左右地层中的岩石力学参数数据体(图5—图6)。

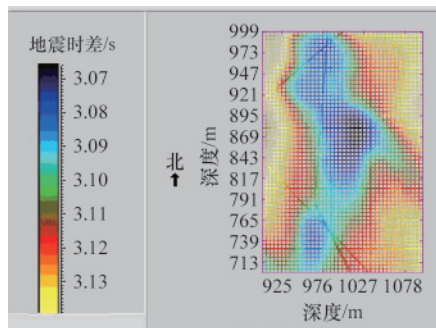


图2 第1地震层位

Fig. 2 First raw seismic layer

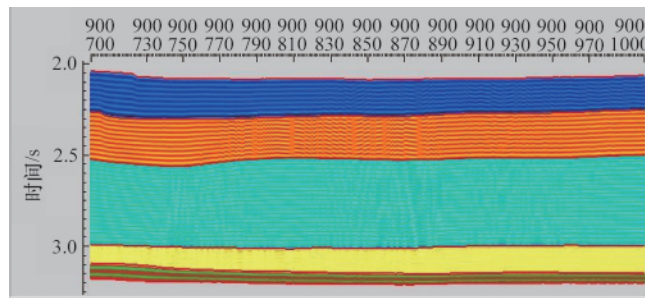


图3 T区块地层框架图

Fig. 3 Stratigraphic map of T blocks

2 压力剖面随钻预测模型

基于地质统计建立井壁稳定预测模型时,整个过程相对简单,主要由于一般钻井时,整个井场中其他已钻井资料并不完整,所以需要根据已有资料建立相关模型,模拟所选区域的岩石力学参数数据体,然后通过经验公式分层得到相关模型,用于钻井中准确确定待钻井段的钻井液密度。

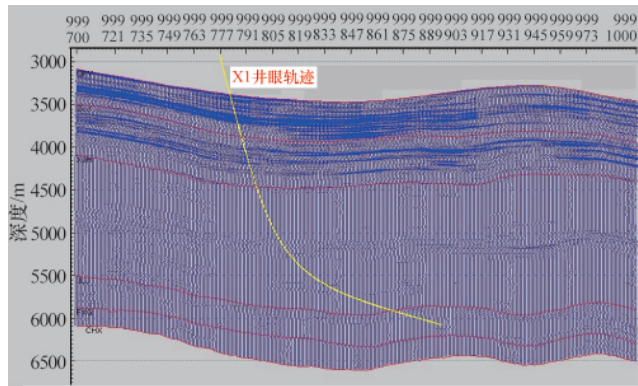


图 4 T 区块泊松比预测模型
Fig. 4 Poisson ratio for the prediction model in T blocks

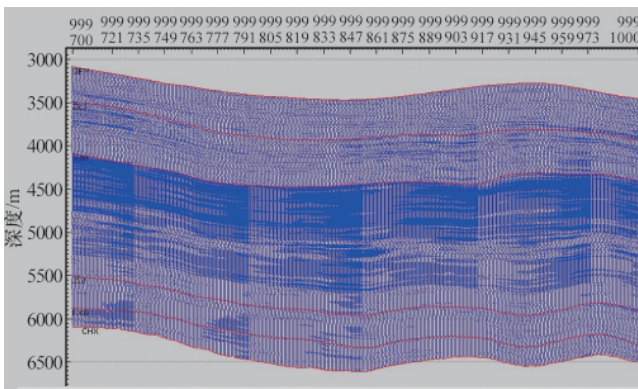


图 5 T 区块最大水平地应力预测模型
Fig. 5 Maximum horizontal stress for the prediction model in T blocks

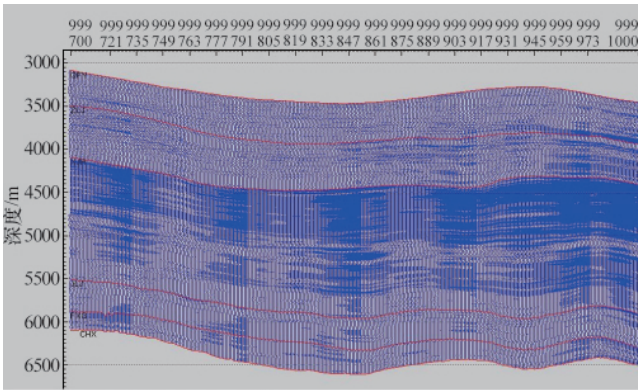


图 6 T 区块最小水平地应力预测模型
Fig. 6 Minimal horizontal stress for the prediction model in T blocks

建立随钻预测模型主要包括以下几个步骤:(1) 整理待钻井场中已钻井的地震、地质、测井、测试等相关资料;(2) 分析待钻井场已钻井的井位,选择有代表性的已钻井作为初始资料获取井,进行序贯高斯模拟时可以验证是否符合所设精度;(3) 利用已钻井的资料计算出单井岩石力学参数;(4) 根据单井岩石力学参数剖面图,通过地质统计方法预测出区域岩石力学参数三维数据体;(5) 根据井场的地质资料,按照地

下岩性的不同划分地层,分层建立岩石力学参数三维数据体;(6) 根据待定向井的井眼轨迹,提取出井位处的岩石力学参数值,根据定向井坍塌、破裂模型,预测坍塌、破裂压力,确定安全泥浆密度;(7) 在钻井过程中,根据岩屑录井资料判断待钻地层岩性,选用合适地层坍塌、破裂模型,预测安全泥浆密度范围;(8) 选择安全泥浆密度进行钻进,对比实际泥浆密度和预测泥浆密度的差值,进行误差分析;(9) 确定合适钻井液密度,根据随钻测井资料及时调整模型参数,确保安全稳定钻进。

在建立某一区块的随钻预测模型时,可能在这个区块待钻井分段使用了 MWD、LWD 等随钻测井仪器,此时随钻预测模型并非无用,相反由于随钻测井资料通过井下传到地面控制系统需要一定时间,而此时就可以根据随钻预测模型,预测出待钻区域三压力剖面,调整合适的安全泥浆密度窗口,安全钻井防止井壁失稳发生,同时可以根据随钻测井资料,对原始地质统计模型进行更新,能更好随钻预测待钻地层的泥浆密度^[3]。

在 X1 井设计施工过程中,设计井深如表 1 所示,合理地运用本文所建井壁稳定性模型,参考预测出易塌井段三压力剖面,如图 7 所示,在下步钻井施工中,根据岩屑录井监测结果,合理调整钻井液密度,优化钻井液性能,确保钻井过程的顺利,避免井壁坍塌事故的发生。

表 1 X1 井设计井深
Table 1 Design depth of well X1

界	系	底深/m
新生界	第三系	第四季
		121.0
		1914.6
		3229.6
中生界	白垩系	4084.6
		4139.6
		4303.6
		4338.6
	侏罗系	4448.6
		5150.0

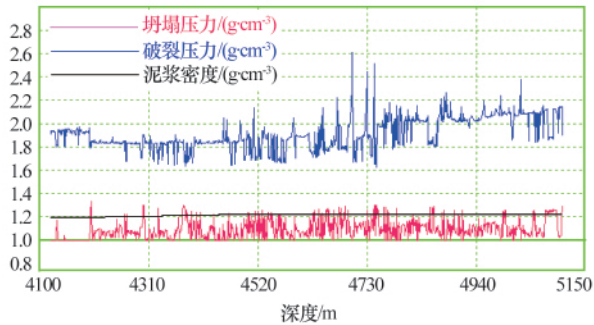


图 7 X1 井坍塌、破裂压力和泥浆密度对比图
Fig. 7 Collapse/fracture pressure and mud density comparison diagram for well X1



通过 T 区块 3 口水平井的应用结果表明, 尽管在 X1 井 4624—4712m 井段由于没有及时地调整钻井液的密度导致井壁坍塌, 但其余两口井井径扩大率均未超过 7%, 有效解决了钻井中易坍塌井段卡钻及固井质量难以保证的问题, 充分证明了所建地质统计模型可靠, 可以应用到油田现场钻井施工中。

表 2 为 X1、X2 和 X3 3 口井破裂压力、最大水平地应力和最小水平地应力的预测值和实际值的误差对比, 其中地应力的值是通过钻井取心, 利用凯赛尔实验得到的, 而破裂压力值则是通过地破试验得到, 通过对比误差分析, 已经完全可以满足工程技术的需要。

表 2 X1、X2 和 X3 的预测和实测数据误差分析

Table 2 Error analysis about the predicted and measured data for wells X1, X2 and X3

井名	深度/m	比较项目	实测值/(g·cm ⁻³)	预测值/(g·cm ⁻³)	预测误差/%
X1	4215	破裂压力当量密度	1.82	1.913	5.11
X2	4390	破裂压力当量密度	1.72	1.801	4.71
X3	4263	最大水平地应力梯度	1.96	1.867	4.74
		最小水平地应力梯度	1.67	1.654	0.96

3 结论

通过对本文的研究, 主要得出以下结论:

(1) 由于地震资料、测井资料数据过多, 导致计算量大, 因此选用相对比较简单的配置协同克里金方法计算变差函数, 通过序贯高斯模拟与之相结合, 整合研究区块的井点和地震信息, 确定出该区块的分层岩石力学参数数据体。

(2) 通过岩石力学经验公式建立定向井井壁坍塌压力、破裂压力和孔隙压力预测模型。在建立预测模型过程中, 同岩屑录井结合起来, 通过分析返排到地面上的钻头破碎处岩屑, 进行筛分, 确定出所钻地层的岩性, 选用合适岩石力学参数模型, 建立三压力剖面图。

(3) 将所建立的模型用于油田钻井施工中, 在本文中所选用的区块中有 11 口已钻井, 3 口待钻水平井, 首先通过 11 口井的资料, 确定出 3 口水平井的安全泥浆密度窗口, 在钻井过程中, 要注意同随钻测井资料相结合, 及时准确更新所建模型, 提高预测待钻井段安全泥浆密度的精度, 降低水平井钻井过程中发生井壁失稳的可能性。

(4) 在钻井过程中, 要及时结合岩屑录井资料, 判断出正在钻进的地层岩性, 结合区块以往钻井过程中, 到达这一地层时井壁失稳情况, 确定安全泥浆密度窗口以及地层理化性能, 为及时有效调整泥浆密度打好基础。

基于本文研究成果, 提出以下几点建议:

(1) 定向井井壁稳定问题是近年来研究的重点, 如何做到钻前预测和随钻预测相结合, 以及钻井过程中及时准确调整钻井液密度及性能, 这是一个值得继续研究的问题。

(2) 定向井井壁稳定随钻预测过程中, 如何将本文提出的地质统计方法建立的随钻预测模型与随钻测井资料有效的结合, 在钻井过程中准确的预测待钻地层的安全泥浆密度, 并及时更新建立的模型, 这个问题值得继续研究。

参考文献 (References)

[1] 金衍, 陈勉, 柳贡慧, 等. 大位移井的井壁稳定力学分析 [J]. 地质力学学报, 1999, 5(1): 4-11.
Jin Yan, Chen Mian, Liu Gonghui, et al. *Journal of Geomechanics*, 1999,

5(1): 4-11
[2] 李军, 陈勉, 金衍, 等. 大位移井井壁稳定三维弹塑性有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2385-2389.
Li Jun, Chen Mian, Jin Yan, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(14): 2385-2389.
[3] 陈勉, 金衍, 张广清. 石油工程岩石力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 139-146.
Chen Mian, Jin Yan, Zhang Guangqing. *Rock mechanics of petroleum engineering*[M]. Beijing: Science Press, 2008: 139-146.
[4] 金衍. 井壁稳定力学研究[D]. 东营: 中国石油大学, 1998.
Jin Yan. *Borehole stability mechanics research* [D]. Dongying: China University of Petroleum, 1998.
[5] 金衍, 陈勉. 钻前井壁稳定预测方法的研究[J]. 石油学报, 2001, 22 (3): 96-99.
Jin Yan, Chen Mian. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(3): 96-99.
[6] Aldred W, Plumb R A, Cousins L. Managing drilling risk[J]. *Oilfield Review*, 1999, 11(2): 2-19.
[7] Smirnov N Y, Tomlinson J C, Brady S D, et al. Advanced modeling, real-time model updating improve extended-reach drilling success[J]. *Oil and Gas Journal*, 2003, 101(4): 39-49.
[8] Bellotti P, Giacca D. Seismic data can detect overpressures in deep drilling[J]. *Oil and Gas Journal*, 1978, 76(34): 46-52.
[9] Reynolds E B. Seismic interpretation for drilling[J]. *Oil and Gas Journal*, 1974, 72(10): 112-124.
[10] Santos H, da Fontoura S A B. Concepts and misconceptions of mud selection criteria: How to minimize borehole stability problems? [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, October 5-8, 1997. doi: 10.2118/38644-MS.
[11] Santarelli F J, Zaho S, urrafato G, et al. Wellbore stability analysis made easy and practical [J]. *SPE Drilling & Completion*, 1997, 12(4): 212-218.
[12] Ray P L. Application of rock mechanics to HPHT and horizontal well drilling and completion: a case study[C]. SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China. Beijing, China, November 2-6, 1998. doi: 10.2118/48878-MS.
[13] 金衍, 陈勉, 陈治喜, 等. 弱面地层的直井井壁稳定力学模型[J]. 钻采工艺, 1999, 22(3): 13-14.
Jin Yan, Chen Mian, Chen Zhixi, et al. *Drilling & Production Technology*, 1999, 22(3): 13-14.

(责任编辑 刘志远)