

DOI: 10.11779/CJGE201510009

基于非线性反演的井壁稳定随钻预测方法

吴超, 刘建华, 张东清, 王磊

(中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘要: 常规井壁稳定预测方法计算量大、操作繁琐、适用范围有限, 严重影响其实钻应用效果。通过考察声波速度、地震记录及井壁稳定参数之间的定量关系, 建立起利用地震资料直接反演孔隙压力、地应力、岩石强度的模型。根据反演模型的非线性特征, 结合井壁稳定参数的地质统计特性, 运用随机地震反演方法预测待钻地层的孔隙压力、地应力、岩石强度, 并根据反演结果进一步预测井壁稳定性。在实钻过程中, 利用录井资料的实时分析和井壁稳定参数的分层地质统计模型, 对钻头前方地层的井壁稳定性进行随钻预测。在川东北元坝气田的应用情况表明, 本方法的综合性能相比常规方法有明显提高, 具有较强的随钻预测能力。

关键词: 井壁稳定; 随钻预测; 地震资料; 非线性; 随机反演

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)10-1810-08

作者简介: 吴超(1976-), 男, 博士, 高级工程师, 目前主要从事油气井岩石力学等方面的研究工作。E-mail: wuchao9138@163.com。

Predicting borehole stability while drilling based on nonlinear inversion

WU Chao, LIU Jian-hua, ZHANG Dong-qing, WANG Lei

(SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China)

Abstract: The conventional borehole stability prediction methods are characterized by a large amount of calculation, complex operation and limited applicability, which can seriously affect real time application of the technology. Through intensive studies on the quantitative relationships between acoustic velocity, seismic data and borehole stability parameters, the direct seismic inversion model for pore pressure, in-situ stress and rock strength is established. Based on the nonlinear characteristics of the inversion model as well as the geological statistics features of borehole stability parameters, pore pressure, in-situ stress and rock strength of the formation to be drilled can be predicted by employing the stochastic inversion method so as to further forecast borehole stability. In actual drilling, the real-time geological logging data and layered statistical mode of borehole stability parameters can be used to predict borehole stability of the formation ahead of bit while drilling. The practical application of the proposed method in Yuanba Gas Field of Northeast Sichuan shows that the proposed method possesses strong ability of prediction while drilling and its comprehensive performance is significantly improved compared with the conventional methods.

Key words: borehole stability; prediction while drilling; seismic data; nonlinearity; stochastic inversion

0 引言

常规井壁稳定分析通常在钻后进行, 通过钻井、测井、钻井等资料的综合分析, 确定井壁失稳机理, 建立地层压力体系模型, 指导后续钻井设计与施工, 这类方法目前已比较成熟^[1-5]。从钻井工程实际需要的角度, 要求对井壁稳定问题尽可能做到提前预知、及早发现、尽快处理, 所以对井壁稳定进行预测在实用性上更加重要, 而在钻进过程中随钻预测钻头前方地层的井壁稳定性对于及时预报并化解井壁失稳风险具有更大的意义。

金衍等在井壁稳定预测研究方面做了开拓性的工

作, 文献[6~8]提出了井壁稳定钻前预测的基本思路和计算模型, 利用地震层速度资料预测地层压力体系。在此基础上, 文献[9~11]进一步提出了用多种地震属性替代精度不高的层速度预测井壁稳定性, 提高了预测精度。文献[12~13]根据地震反演原理预测井壁稳定性, 需要先反演波阻抗再预测井壁稳定, 其计算量较大、运算效率较低, 仅用于钻前预测。文献[14~16]

基金项目: 国家科技重大专项专题项目(2011ZX05005-006-001)

收稿日期: 2015-01-15

*通讯作者

用。地质统计理论将空间任一点处某类区域化地质变量都看作随机变量,这种随机性用以表征地质参数观测过程中的误差和随机因素;同时认为不同空间点上的随机变量之间具有相关性,这种相关性可以表征该变量在地层空间内的连续分布和各向异性^[21]。孔隙压力作为井壁稳定分析的关键参数,具备随机变量的特征,因此可用随机反演方法实现方程组(7)的求解。

随机反演不依赖于初始模型,包括随机模拟和反演计算两个过程,首先通过随机模拟方法逐次随机建立孔隙压力的空间数据模型,根据该模型利用式(5)计算合成地震记录,通过反复迭代直至合成地震记录和原始地震记录达到某种程度的匹配^[22]。这种算法在保证反演结果忠实于地震信息的同时,还能充分反映孔隙压力等地质参数的空间分布特征与随机性。迭代过程由目标函数与随机模拟结果决定,反演计算过程稳定。反演结果分辨率较高,较适合孔隙压力的随钻精细预测。

在实际应用中,利用随机模拟可以得到多个能反映孔隙压力空间分布特征的等概率的高分辨率数据模型。随机模拟首先考虑地质变量的空间全局相关性,再关注局部预测值的精确度。与克里金光滑估值不同,随机建模在光滑趋势上附加随机噪声,以更好表征真实压力的波动趋势。鉴于孔隙压力随钻预测的目标井段一般不长,孔隙压力变量基本上符合高斯分布,从计算精度与运算量角度综合考虑,本文采用序贯高斯模拟算法进行随机模拟。

基于以上论述,设计出利用地震资料反演孔隙压力的算法流程:①提取待预测井段的井旁地震记录数据,确定随机反演的空间区域;②选取完钻邻井相同地质层系井段的测井数据精确计算该段孔隙压力,将其作为条件数据;③按随机方式模拟目标区域某点的孔隙压力;④利用条件数据建立该点的累积条件分布函数;⑤随机地从累积条件分布函数中随机地提取一个分位数作为该点的压力模拟值;⑥将该新模拟值加入条件数据组中;⑦重复以上步骤,直到目标空间所有点都被模拟,从而得到一次孔隙压力模拟实现;⑧基于本次压力模拟值,利用式(5)计算合成地震记录;⑦计算目标函数,当其小于指定值时,可以认为本次压力模拟值即为本井段最终反演的孔隙压力,如误差不能满足要求,则回到步骤②重新迭代计算。

在序贯模拟过程中,依次对 l 个空间点进行模拟,就要确定 l 次累积条件分布函数,且每次条件数据依次增加,即

$$\begin{aligned} P_{p,1} &\propto P[P_{p,1} \leq z_1(n_0)] \\ P_{p,2} &\propto P[P_{p,2} \leq z_2(n_0+1)] \\ &\dots \\ P_{p,l} &\propto P[P_{p,l} \leq z_l(n_0+l-1)] \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $P_{p,1}, P_{p,2}, \dots, P_{p,l}$ 为空间各点的待模拟的孔隙压力值(MPa); $z_1(n_0), z_2(n_0+1), \dots, z_l(n_0+l-1)$ 表示从已知累积条件分布函数中随机提取的分位点; n_0 为原始条件数据个数; l 为待模拟的空间点数; \propto 表示按概率随机提取的操作。

对于已知条件数据点,待模拟点处孔隙压力变量的累积条件分布函数是正态的,且其条件期望和方差与其克里金估计值一致,即

$$f(P_{p,0}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(P_{p,0} - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], \quad (9)$$

$$[P_{p,0} | P_{p,s}] \sim N(\mu_s, \sigma_s^2), \quad (10)$$

以上两式中, $f(P_{p,0})$ 表示随机变量 $P_{p,0}$ 的高斯分布概率密度; $[P_{p,0} | P_{p,s}]$ 表示在已模拟值 $P_{p,s}$ 的条件下的待模拟变量 $P_{p,0}$; $N(\mu_s, \sigma_s^2)$ 表示参数为 μ_s 和 σ_s^2 的高斯分布; μ_s 和 σ_s^2 分别为在已模拟值 $P_{p,s}$ 的条件下由克里金方法求取的均值和方差,其详细计算方法可参阅文献[23]。

2.2 地应力、岩石强度参数的直接反演

地应力反演的思路和孔隙压力的反演基本一致,首先根据岩石力学理论建立地应力和声波速度的定量关系,基于这种关系利用与上文相同的地震反演方法求取地应力,限于篇幅,以下直接给出地应力与声波速度的关系模型:

$$\begin{cases} \rho \cdot v_p^2 = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \\ \mu = (D-C)/(2B+C+D) \\ E = A(1+\nu)/\xi_h \\ D = 2\sigma_H - 4\alpha P_p - A \\ C = A\xi_H/\xi_h \\ B = \sigma_v - \alpha P_p \\ A = \sigma_H - \sigma_h \end{cases} \quad (11)$$

式中 σ_H, σ_h 为水平方向的最大和最小地应力(MPa); ξ_H, ξ_h 表示应力构造系数(无量纲); α 为有效应力系数(无量纲); P_p 为孔隙压力(MPa); σ_v 为上覆压力(MPa); E 为弹性模量(MPa); ν 为泊松比(无量纲)。考虑到常规手段求取 ξ_H, ξ_h 存在难度,将其作为未知量参与反演。在地应力的地震反演过程中,式(11)的作用与孔隙压力反演中式(2)的作用基本一致,而且地应力的反演需要直接用到前期的孔隙压力反演结果,此外还需应用式(3)从式(11)

中密度和速度的乘积中分离出速度值。

井壁稳定计算中需要用到的岩石强度参数包括黏聚力、内摩擦角、抗拉强度等, 试验和理论研究表明这些参数与声波速度存在一定的定量关系^[24], 因此可以使用与孔隙压力和地应力反演相似的思路和方法来求取强度参数, 限于篇幅这里不再论述其具体运算过程。

在得到孔隙压力、地应力、岩石强度参数的基础上, 可以运用井壁稳定力学计算方法求取井壁坍塌压力和破裂压力, 利用计算结果可定量分析井壁稳定状态, 这部分内容目前已经比较完善^[25], 这里不再赘述。

3 井壁稳定随钻预测方法

在前两节论述内容的基础上, 以下给出井壁稳定随钻预测模型的具体操作流程:

(1) 钻前阶段的分析计算工作

- a) 收集、整理与分析目标区块完钻井的测井、钻井、地质、测试等资料;
- b) 以测井数据为基础, 结合其他资料, 求取完钻井的孔隙压力、地应力、岩石强度数据;
- c) 根据完钻井的孔隙压力、地应力、岩石强度数据, 分层段进行地质统计分析, 建立以上井壁稳定参数的分层变差函数模型, 供实钻计算时使用。

(2) 实钻过程中的随钻预测工作

- a) 实时分析录井资料, 确定当前钻头位置;
- b) 从已建立的分层孔隙压力变差函数模型中选取对应于当前钻遇地层的模型参数, 利用 2.1 节论述的方法反演钻头前方一定深度内的某井段 (以下称 A 井段) 的孔隙压力;
- c) 利用 2.2 节论述的方法随钻预测 A 井段的地应力、岩石强度、坍塌压力、破裂压力;
- d) 基于以上预测结果, 随钻预测评价 A 井段的井壁稳定性与安全钻井液密度窗口, 根据分析结果实时调整钻井液性能以控制井壁失稳。

这里还要说明两点。首先, 本方法应使用叠后地震资料, 这主要因为叠前、随钻地震数据处理工作量巨大、不易获取, 且式 (5) 不适用于叠前地震资料。第二, 笔者在井壁稳定参数反演计算中也尝试使用过诸如遗传算法、模拟退火、神经网络等智能优化方法, 通过比较发现, 对于超大型、非线性程度较高的方程组 (7), 智能方法的计算稳定性、操作简易度、运算速度、预测精度均明显逊色于随机反演方法。

4 现场应用情况

川东北元坝探区属超深井区, 区内探井目的层埋深均在 6000 m 以上, 且钻遇层系多, 地层岩性、流

体与构造应力分布非常复杂, 钻井地质环境空间差异性较大, 勘探前期对各类钻井地质条件掌握不准确、不全面, 造成前期探井部分层段井壁稳定性较差, 卡钻、漏失、溢流复杂频繁发生。

笔者收集了元坝探区的钻井、测井、物探等资料, 将上文介绍的方法应用于该区侏罗系与三叠系较复杂地层的井壁稳定随钻预测中, 以下重点介绍其中自流井与须家河组地层的随钻预测情况。自流井与须家河组地层为碎屑岩地层, 砂泥岩互层频繁, 多处含碳质泥岩及煤层, 普遍发育低渗气层且压力较高, 部分裂隙发育层段承压能力较低, 以上地质条件导致前期探井在钻遇自流井与须家河组地层过程中井壁失稳严重, 钻井复杂故障频繁发生, 该地层成为制约钻井提速提效的瓶颈层段。

Y104 井与 Y123 井是本方法在现场应用的 2 口试验探井, 两探井位于元坝中部井区, 施工时间也比较接近。笔者钻前利用同井区 6 口完钻邻井的测井、钻井等资料计算得到了各井的岩石强度、孔隙压力、地应力数据。针对自流井与须家河组地层, 钻前分别建立了这 2 套地层共计 9 套层组 (其中自流井组包含大安寨段、马鞍山段、东岳庙段、珍珠冲段, 须家河组包含须五段至须一段) 的井壁稳定参数地质统计模型。在实钻过程中, 通过分析录井资料确定当前钻头位置, 当钻进至各层组的顶部时, 从钻前建立的分层地质统计模型中选取对应于钻遇层组的统计模型参数, 按上文所述方法预测得到 9 套层组的强度、孔隙压力、地应力、坍塌压力和破裂压力, 进一步可以随钻预测各层组的井壁稳定状态。

图 1 为利用随机反演方法预测得到的自流井与须家河组地层的孔隙压力预测剖面。必须指出, 为了保证反演计算的整体精度和稳定性, 需要利用覆盖试验井的三维地震数据进行多地震道的反演计算, 限于篇幅, 图 1 仅给出包含 Y104 井与 Y123 井的联井压力剖面, 图上横坐标表示由纵横测线确定的测网位置, 纵坐标为井深, 孔隙压力的大小以图中左上角的色带区分, 图上还标出了 2 口试验井的井位。图 2 和图 3 分别为基于相似的随机反演思路预测得到的水平地应力 (以最小地应力为例) 与岩石强度 (以黏聚力为例) 剖面, 其剖面位置与图 1 相同。需要说明的是, 在孔隙压力和地应力的反演计算过程中, 除了可直接反演得到孔隙压力和地应力数据, 还可以同时求解出式 (2) 及式 (11) 中的 6 个模型参数, 计算结果表明, 对于元坝地区的陆相下部地层, $C_1 = 1.912$, $C_2 = 0.0496$, $C_3 = -0.440$, $C_4 = -0.159$, $\xi_h = 0.0013$, $\xi_v = 0.00062$, 通过地震反演得到的这些模型参数值相比于根据少量测试数据统计得到的拟合值显然更加可靠。

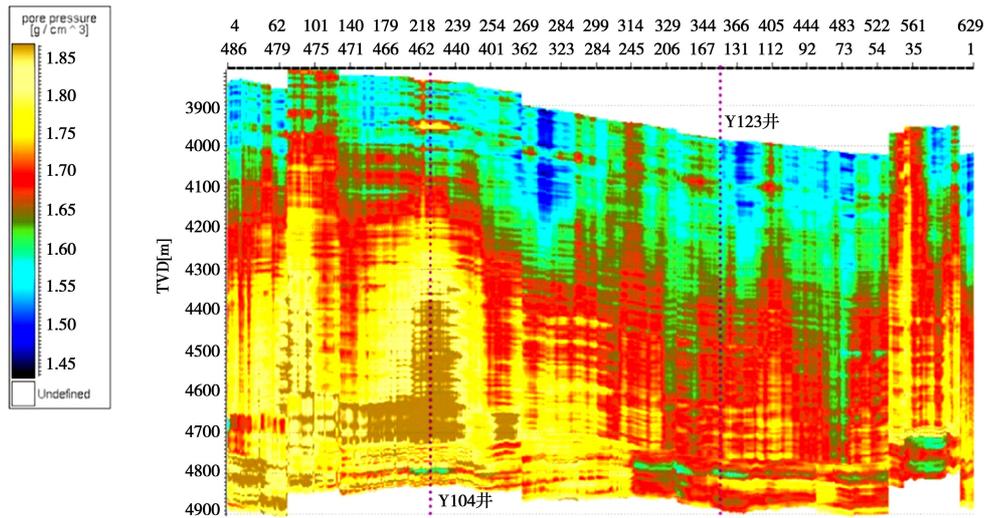


图1 根据地震反演得到的自流井与须家河组地层孔隙压力预测剖面

Fig. 1 Predicted profile of pore pressure of Ziliujing and Xujiache formation by seismic inversion

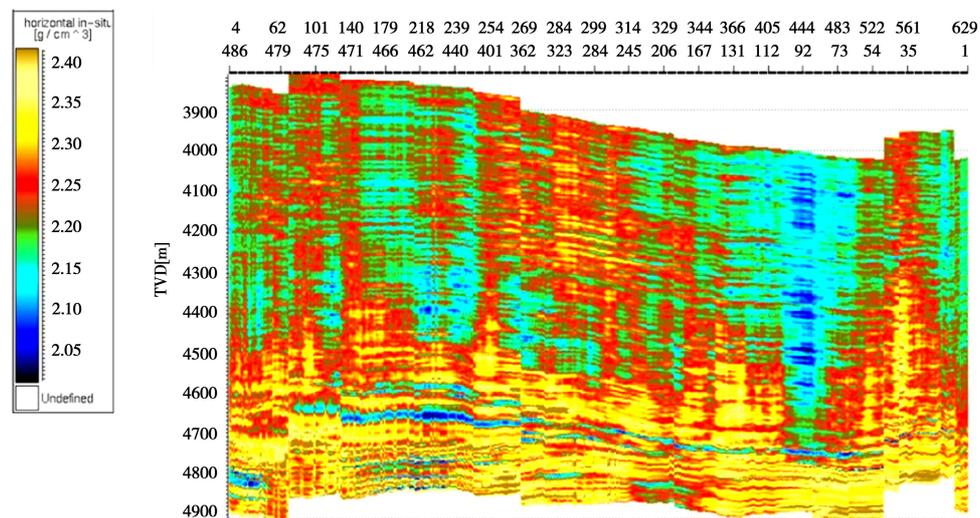


图2 根据地震反演得到的自流井与须家河组地层最小水平地应力预测剖面

Fig. 2 Predicted profile of minimum horizontal in-situ stress of Ziliujing and Xujiache formation by seismic inversion

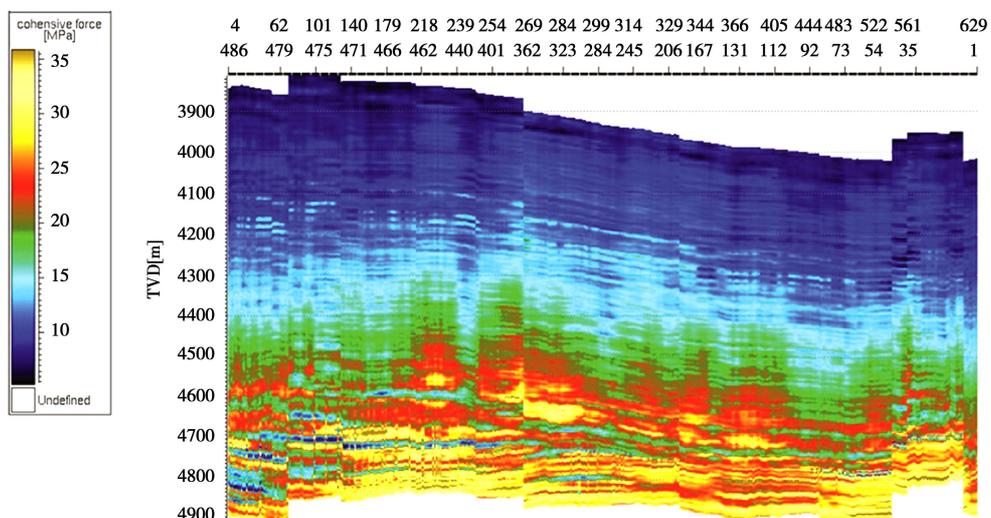


图3 根据地震反演得到的自流井与须家河组地层岩石黏聚力预测剖面

Fig. 3 Predicted profile of cohesion of Ziliujing and Xujiache formation by seismic inversion

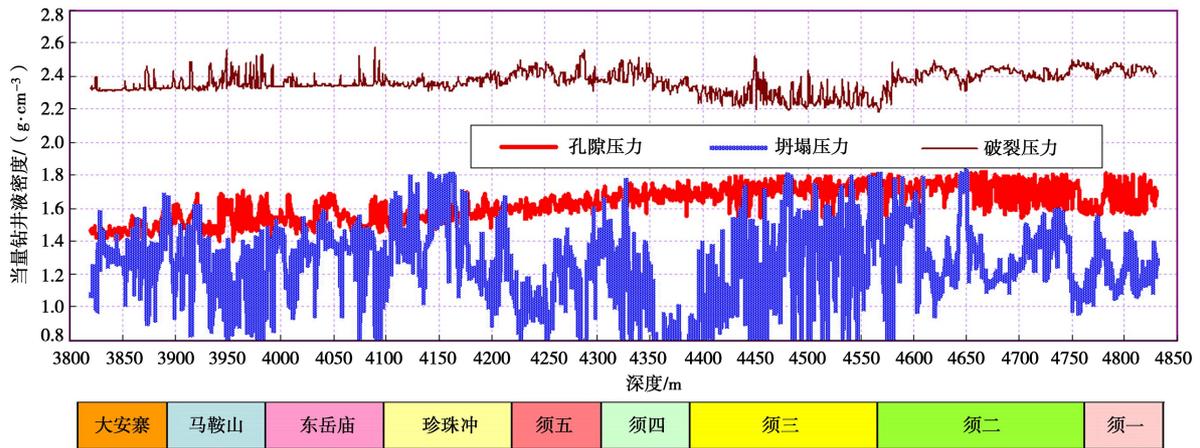


图 4 Y104 井自流井与须家河组地层孔隙、坍塌与破裂压力预测曲线

Fig. 4 Predicted curves of pore pressure, collapse pressure and fracture pressure of Ziliujing and Xujiuhe formation of well Y104

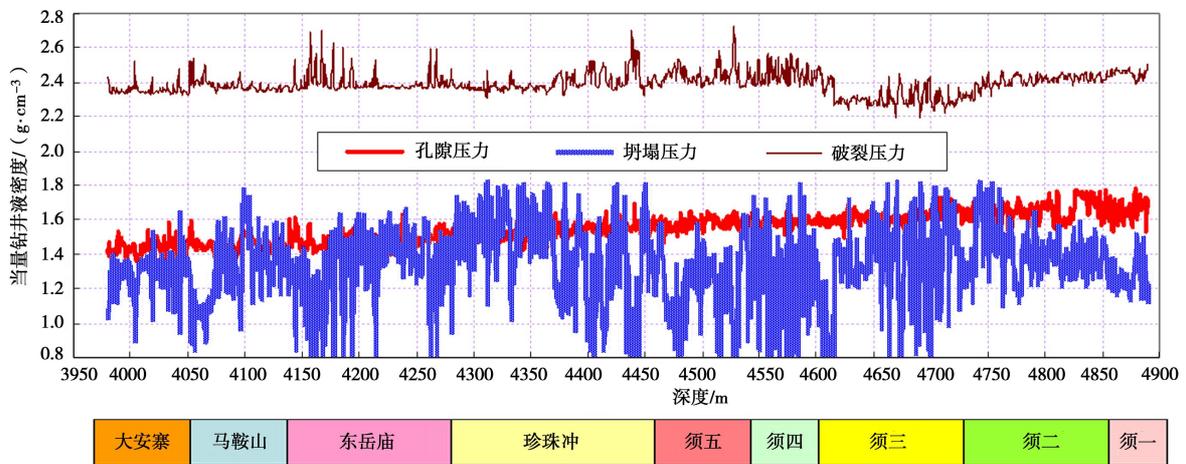


图 5 Y123 井自流井与须家河组地层孔隙、坍塌与破裂压力预测曲线

Fig. 5 Predicted curves of pore pressure, collapse pressure and fracture pressure of Ziliujing and Xujiuhe formation of well Y123

基于上述预测数据模型, 随钻预测得到 2 口试验井目标层段的孔隙压力、坍塌压力与破裂压力曲线(如图 4 与图 5 所示)。为节约篇幅, 在以上各图中, 对多次随钻预测的参数均做了合并处理。根据压力预测结果可实时优化调整钻井液密度, Y104 井与 Y123 井在自流井与须家河组地层实际使用的钻井液密度分别为 $1.74 \sim 1.99 \text{ g/cm}^3$ 与 $1.71 \sim 1.95 \text{ g/cm}^3$ 。电测结果表明, 2 口试验井在目标井段的井径扩大率基本控制在 7% 以内, 与前期完钻井的相同层段相比, 平均井径扩大率减小了 43.6%, 同时试验井的目标层段的平均机械钻速同比提高了 23.3%, 这说明井壁稳定随钻预测的结果是合理的。为了进一步验证预测效果, 将试验井的预测数据和实测数据进行了对比(见图 1), 从表 1 可见各参数的预测精度基本满足工程要求。多口井的现场应用还表明, 本方法迭代计算过程稳定, 反演计算速度快, 操作流程简便, 具有较强的实钻应用能力。另外, 常规地震属性预测方法一般适用于勘探程度较高区块内的直井, 而本方法则不受此限制, 因此该方

法在现场具有良好的推广应用前景。

表 1 试验井预测和实测数据对比

Table 1 Comparison of predicted and measured data of test wells

井名	深度	对比项目	实测值 $/(g \cdot cm^{-3})$	预测值 $/(g \cdot cm^{-3})$	预测 精度/%
Y104	4755	孔隙压力	1.92	1.82	94.79
Y104	4049	孔隙压力	1.83	1.76	96.17
Y104	4146	最大水平地应力	2.41	2.54	94.61
		最小水平地应力	2.19	2.26	96.80
Y123	4858	破裂压力	2.33	2.45	94.85
Y123	4733	孔隙压力	1.88	1.75	93.09

5 结 论

(1) 井壁稳定参数、波速、地震信息之间存在定量关系, 根据其可以建立孔隙压力、地应力、岩石强

度参数的地震反演模型,进一步可预测井壁稳定性。

(2) 根据反演模型的非线性特征及井壁稳定参数的地质统计特征,运用随机地震反演方法求取井壁稳定参数,在保证反演结果精确度的同时,还能有效反映地质参数的空间相关性与随机性。

(3) “随钻预测”是本方法的重要特点,其关键环节是录井资料的实时分析以及井壁稳定参数的分层地质统计建模,以此为基础随钻预测钻头前方地层的井壁稳定性。

(4) 从预测精度、适用条件、实钻应用能力、计算稳定性、操作简易度等方面考虑,本文提出的预测方法相比传统方法在综合性能上有明显提高。

参考文献:

- [1] AADNOY B S, ANGELL-OLSEN F. Some effects of ellipticity on the fracturing and collapse behavior of a borehole[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1995, **32**(6): 621 - 627.
- [2] BELL J S. Practical methods for estimating in situ stresses for borehole stability applications in sedimentary basins[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2003, **38**(3/4): 111 - 119.
- [3] STJERN G, AGLÉ A, HORSRUD P. Local rock mechanical knowledge improves drilling performance in fractured formations at the Heidrun field[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2003, **38**(3/4): 83 - 96.
- [4] AADNOY B S, ONG S. Introduction to special issue on borehole stability[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2003, **38**(3/4): 79 - 82.
- [5] ZHANG Jin-cai. Borehole stability analysis accounting for anisotropies in drilling to weak bedding planes[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, **60**: 160 - 170.
- [6] 金 衍, 陈 勉, 张旭东. 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, ZHANG Xu-dong. Study on prediction for borehole stability before drilling[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, **22**(3): 96 - 99. (in Chinese))
- [7] 金 衍, 陈 勉, 杨小奇. 利用层速度钻前预测安全泥浆密度窗口[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, **23**(14): 2430 - 2433. (JIN Yan, CHEN Mian, YANG Xiao-qi. Prediction of safe mud density window by interval velocity before drilling[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(14): 2430 - 2433. (in Chinese))
- [8] 金 衍, 陈 勉, 吴 超. 探井二开以下地层井壁稳定性钻前预测方法[J]. *石油勘探与开发*, 2008, **35**(6): 742 - 745. (JIN Yan, CHEN Mian, WU Chao. Borehole stability prediction before drilling for formations under the second section in an exploration well[J]. *Petroleum Exploration and Development*. 2008, **35**(6): 742 - 745. (in Chinese))
- [9] 金 衍, 陈 勉. 利用地震记录钻前预测井壁稳定性研究[J]. *石油学报*, 2004, **25**(1): 89 - 92. (JIN Yan, CHEN Mian. Prediction of borehole stability by seismic records[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, **25**(1): 89 - 92. (in Chinese))
- [10] 吴 超, 陈 勉, 金 衍. 利用地震属性钻前预测井壁稳定性[J]. *石油钻探技术*, 2006, **34**(3): 96 - 99. (WU Chao, CHEN Mian, JIN Yan. Predicting borehole stability before drilling using seismic attributes[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2006, **34**(3): 96 - 99. (in Chinese))
- [11] 吴 超, 陈 勉, 金 衍. 利用地震分形属性钻前预测安全钻井液密度范围[J]. *钻井液与完井液*, 2006, **23**(4): 32 - 34. (WU Chao, CHEN Mian, JIN Yan. Predicting safe drilling fluid density range by seismic fractal attributes[J]. *Drilling Fluid and Completion Fluid*, 2006, **23**(4): 32 - 34. (in Chinese))
- [12] 慈建发. 钻前井壁力学稳定性研究[D]. 南充: 西南石油学院, 2005. (CI Jian-fa. Study on borehole mechanical stability before drilling[D]. Nanchong: Southwest Petroleum Institute, 2005. (in Chinese))
- [13] 吴 超, 陈 勉, 金 衍. 利用地震反演技术钻前预测井壁稳定性[J]. *石油钻采工艺*, 2006, **28**(2): 18 - 20. (WU Chao, CHEN Mian, JIN Yan. Prediction borehole stability before drilling by seismic inversion[J]. *Oil Drilling and Production Technology*, 2006, **28**(2): 18 - 20. (in Chinese))
- [14] WU Chao, CHEN Mian, JIN Yan. A prediction method of borehole stability based on seismic attribute technology[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2009, **65**(3/4): 208 - 216.
- [15] 吴 超, 陈 勉, 金 衍. 井壁稳定实时预测新方法[J]. *石油勘探与开发*, 2008, **35**(1): 80 - 84. (WU Chao, CHEN Mian, JIN Yan. Real-time prediction method of borehole stability[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, **35**(1): 80 - 84. (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*, 2007, **31**(6): 141 - 146. (WU Chao, CHEN Mian, JIN Yan. The prediction

- model of borehole stability based on seismic attribute technology[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, **31**(6): 141 - 146. (in Chinese))
- [17] 赵海峰, 陈 勉. 基于实钻资料的井壁稳定实时预测理论[J]. 石油学报, 2011, **32**(2): 324 - 328. (ZHAO Hai-feng, CHEN Mian. Real-time prediction of borehole stability based on actual drilling data[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, **32**(2): 324 - 328. (in Chinese))
- [18] HAN D H, NUR A, MORGAN D. Effect of porosity and clay content on wave velocities in sandstone[J]. Geophysics, 1986, **51**(11): 2093 - 2107.
- [19] EBERHART-PHILLIPS D, HAN D H, ZOBACK M D. Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity and clay content in sandstone[J]. Geophysics, 1989, **54**(1): 82 - 89.
- [20] 王德人. 非线性方程组解法与最优化方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979. (WANG De-ren. Solution of nonlinear equations and optimization method[M]. Beijing: Higher Education Press, 1979. (in Chinese))
- [21] 吴胜和, 金振奎. 储层建模[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999. (WU Sheng-he, JIN Zhen-kui. Reservoir modeling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999. (in Chinese))
- [22] 黄捍东, 张如伟, 魏世平. 地震非线性随机反演方法在陆相薄砂岩储层预测中的应用[J]. 石油学报, 2009, **30**(3): 386 - 390. (HUANG Han-dong, ZHANG Ru-wei, WEI Shi-ping. Research on application of seismic nonlinear random inversion to reservoir in the thin sandstone in the continental deposits[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, **30**(3): 386 - 390. (in Chinese))
- [23] 侯景儒, 尹镇南. 实用地质统计学[M]. 北京: 地质出版社, 1998. (HOU Jing-ru, YIN Zhen-nan. Practical geostatistics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. (in Chinese))
- [24] 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 Guang-ying. Rock mechanics in petroleum engineering[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese))
- [25] 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 Yi-shan, JIN Ye-quan. Rock mechanics and petroleum engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006. (in Chinese))

欢迎订阅《勘察科学技术》

《勘察科学技术》是由中勘冶金勘察设计研究院有限责任公司(原冶金勘察研究总院)主办的学术—技术类双月刊,是中国科技论文统计源期刊,中国地质文摘引用期刊,中国学术期刊(光盘版)、中国期刊网万方数据科技期刊群全文收录期刊,多次被评为河北省优秀期刊。

《勘察科学技术》主要介绍岩土工程设计与施工、工程地质、环境地质、水文地质及地下水资源评价、工程测量及地理信息系统、工程物探、岩土测试、工程检测及地下管网探测等专业的科研成果、生产经验、工程实录以及新理论、新技术、新方法。

《勘察科学技术》内容丰富,理论结合实际,适于从事岩

土工程及勘察的广大科研、设计、施工、监理、教学的专业技术人员及高等院校学生阅读、收藏。

《勘察科学技术》国内外公开发行,双月刊,大 16 开本,双月 20 日出版。每期定价 10.0 元,全年 60 元。邮发代号 18-153。全国各地邮局均可订阅,也可随时汇款到本编辑部订阅。

本刊兼营广告,价格适中,印制精良,注重实效。

欢迎广大读者投稿、订阅和广告惠顾。

地址:河北省保定市东风中路 1285 号《勘察科学技术》编辑部,邮编:071069, Tel: 0312-3020887, 3094054, Fax: 0312-3034561, E-mail: kckxjs@163.com, kckxjs@126.com。

(《勘察科学技术》编辑部 供稿)