

文章编号: 0253-2697(2016)03-0399-07 DOI:10.7623/syxb201603012

钻井液密度窗口随钻预测理论及其工程应用

吴 超 陈小锋 王 磊

(中国石油化工有限公司石油工程技术研究院 北京 100101)

摘要:将岩石力学方法与地震勘探理论相结合,通过考察地震记录、岩石物理参数与孔隙压力之间的定量关系,建立了利用地震数据直接反演孔隙压力的模型。根据岩石力学参数地质统计特性,实钻过程中充分利用录井、钻井等实时信息,通过随机反演方法随钻预测钻头前方待钻地层的孔隙压力。依据孔隙压力反演结果进一步求取地应力、岩石强度、坍塌压力与破裂压力,通过对预测参数的综合分析,最终实现对待钻井段的安全钻井液密度窗口进行随钻预测。该方法在川东北 HB 探区的 2 口深探井进行了工程应用,现场应用情况表明该方法预测精度较高、实时操作简捷、计算过程稳定,具备良好的随钻适用性。

关键词:钻井液密度窗口;随钻预测;地质统计;随机反演;川东北探区

中图分类号:TE22

文献标识码:A

A theory on predicting drilling fluid density windows while drilling and its engineering application

Wu Chao Chen Xiaofeng Wang Lei

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

Abstract:Based on rock mechanics methods in combination with seismic exploration theories, a model that uses seismic data to directly retrieve pore pressure is established through investigating the quantitative relationship between seismic records, rock physical parameters and pore pressure. According to the geological statistical characteristics of rock mechanical parameters, as well as logging, drilling and other real-time information in the actual drilling process, this study predicts pore pressure of the strata to be drilled using a stochastic inversion method. Based on the inversion results of pore pressure, in-situ stress, rock strength, collapse pressure and fracture pressure are further solved. Through comprehensive analysis of the predicted parameters, the safe drilling fluid density windows of target strata are finally predicted while drilling. This method has been used for engineering application in the HB exploration area of northeast Sichuan. Field application results show that this method has high predicting precision, simple real-time operation, stable calculation process and good application in drilling.

Key words:drilling fluid density windows; prediction while drilling; geological statistics; stochastic inversion; Northeast Sichuan exploration area

引用:吴超,陈小锋,王磊. 钻井液密度窗口随钻预测理论及其工程应用[J]. 石油学报,2016,37(3):399-405.

Cite:Wu Chao,Chen Xiaofeng,Wang Lei. A theory on predicting drilling fluid density windows while drilling and its engineering application[J]. Acta Petrolei Sinica,2016,37(3):399-405.

钻井工程中确定合理的安全钻井液密度窗口对于实现优质、快速施工具有重要指导意义,而基于岩石力学理论的地层孔隙压力、坍塌压力与破裂压力计算与分析在其中起着关键作用。传统的钻井液密度窗口分析理论通常根据前期完钻井各类资料的综合分析,建立井周应力与地层压力体系模型,确定探区地层压力体系的分布规律,为下阶段钻井设计及施工提供数据支撑,当前这些方法使用非常普遍,而且发展得较为完

善^[1-6]。随着钻井技术的进步,工程师们要求在钻前或实钻中提前预知待钻地层的井壁力学特性,以便尽早发现并有效处理溢流、垮塌、漏失等复杂故障,所以有效利用地震信息进行钻井液密度窗口钻前预测更具意义,而进一步结合实钻资料随钻预测密度窗口也具有更强的实用性。

钻井液密度窗口预测研究已经开展了近 20 年,有学者对钻前预测理论进行了系统研究^[7-9],可根据地震

基金项目:国家重大科技专项“海相油气井井筒环境监测技术”(2011ZX05005-006-001)资助。

第一作者及通信作者:吴超,男,1976年7月生,2002年获石油大学(华东)学士学位,2008年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油化工有限公司石油工程技术研究院高级工程师,主要从事井壁稳定力学分析、钻井工程优化设计等方面的研究工作。Email:wuchao9138@163.com

层速度信息预测安全钻井液密度窗口;也有学者通过合理选择地震特征参数(地震属性),优化了密度窗口钻前预测方法,预测精度得到提高^[10];参照地震反演的思路,运用非线性反演算法预测地层压力体系^[11],但该方法计算量较大,精度有限,一般适合指导探井设计使用;基于地震属性智能优化的思路,形成了钻井液密度窗口随钻预测技术^[12-14],有效降低了计算误差,扩大了适用范围,但该技术运算步骤繁多,操作较为复杂;利用实钻资料建立实时反演井周应力状态的模型^[15],但其仅能反演得到钻头附近的岩石力学参数。当前钻井液密度窗口预测技术仍在不断优化完善中,在实钻操作能力、运算简易度、预测精度等方面仍有待进一步提高。

岩石力学理论表明,地层孔隙压力、地应力、岩石强度是决定井壁喷、塌、漏、卡风险大小的关键参数,而其中孔隙压力预测难度最大。本文将岩石力学方法与地震勘探理论结合起来,通过分析地震记录、岩石物理参数、孔隙压力之间的定量关系,提出了孔隙压力的直接反演算法。基于常规地震和测井资料,结合钻井、录井与测试数据,根据数值优化理论和岩石力学参数的地质统计特性,运用随机反演方法随钻预测钻头前方未钻地层的孔隙压力;根据反演结果进一步求取地应力与岩石强度参数,进而运用井壁稳定力学分析方法实时预测坍塌压力与破裂压力,最终可随钻评估待钻地层的安全钻井液密度窗口。

1 孔隙压力直接反演模型

首先考察地层孔隙压力与岩石物理参数之间的定量关系。根据对岩石物理与力学特性参数之间关系的实验与理论研究^[16],影响岩石声波传播速度的主要因素包括有效应力、孔隙度、泥质含量,这些参数之间的定量关系为:

$$\begin{cases} v_p = C_1 + C_2 \phi + C_3 \sqrt{V_{sh}} + C_4 (p_e - e^{C_5 p_e}) \\ p_p = \sigma_v - \alpha p_e \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中的上覆地层压力一般根据密度测井数据计算得到,而其中的模型系数可通过测试、测井等数据经统计计算而得。

通过对岩石声速等岩石物理参数的综合研究,发现纵、横波速度和孔隙压力、泥质含量之间存在一定的定量关系^[10]:

$$\begin{cases} \phi = a_1 + a_2 v_s + a_3 v_p \\ V_{sh} = b_1 + b_2 v_s + b_3 v_p \\ v_s = \sqrt{c_1 v_p + c_2} + c_3 \end{cases} \quad (2)$$

模型中的9个经验系数可基于岩石物理实验成果通过拟合确定。

根据对大量岩石样品的实验室测试结果进行统计,地层密度和纵波速度之间存在一定的定量相关性,通常以 Gardner 公式表示:

$$\rho = A_1 v_p^{A_2} \quad (3)$$

按照地球物理相关理论,地震波反射系数的大小取决于弹性分界面上下地层波阻抗的差异,而波阻抗的大小由速度和密度决定,即:

$$r_i = \frac{\rho_{i+1} v_{i+1} - \rho_i v_i}{\rho_{i+1} v_{i+1} + \rho_i v_i} \quad (4)$$

综合分析式(1)~式(4)可以发现,地层反射系数可以表示为以孔隙压力为自变量的函数,即:

$$r = F(p_p) \quad (5)$$

根据勘探地震学原理,反射地震记录可以通过地震子波和地层反射系数进行褶积运算得到:

$$s = w * r \quad (6)$$

结合式(6)进一步可以导出地震数据和孔隙压力之间的关系:

$$s = w * F(p_p) \quad (7)$$

对于每道地震记录,令 $F'(p_p) = w * F(p_p) - s = 0$,可以建立方程组:

$$\begin{cases} F'_1 \{ p_p(1), p_p(2), \dots, p_p(m) \} = 0 \\ F'_1 \{ p_p(1), p_p(2), \dots, p_p(m) \} = 0 \\ \dots \\ F'_n \{ p_p(1), p_p(2), \dots, p_p(m) \} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式(8)实际上是一个非线性方程组,一般来说是超定的。与具有成熟解法的线性方程组相比,求解这类方程组存在一定困难。通常的思路是运用非线性最小二乘理论,将式(8)的求解转化为目标函数达最小的无约束最优化问题,通过逐次迭代求解最优解,对于这类问题目前比较有效的方法是高斯-牛顿法及其若干改进形式^[17]。

但是,式(8)使用常规算法求解存在一定问题。首先,尽管采取总体收敛改进算法,由于目标问题非线性程度较高,且实际可能存在较严重的大残量问题,高斯-牛顿法局部收敛速度可能非常慢;其次,高斯-牛顿法必须在初始模型基础上迭代求解,且对其有着严格要求,初始解选取不合理会导致求解失败;再次,孔隙压力等地质参数具有空间相关性与分布随机性等地质统计特征,传统的数值优化算法求解过程很难反映这些特殊性质。因此需要将理论数学模型和地质统计方法结合起来处理孔隙压力方程组的求解问题。

2 钻井液密度窗口的预测方法

2.1 孔隙压力的求取

从地质统计理论的角度来看,地下一定空间区域

内分布的渗透率、泥质含量、孔隙压力等地质参数均可视为区域化变量,由于参数观测中可能的随机误差因素,将空间任一点固定后,该处某类区域化变量可看作随机变量;另一方面,在空间各点之间该区域化变量又体现出连续性和关联性,因此区域化变量可同时反映出地质参数的空间结构性和随机性。

随机地震反演方法是以区域化变量理论为基础提出的^[18],通过随机模拟逐次建立孔隙压力数据模型,通过式(7)对每次建立的模型正演合成地震记录,将合成记录与实际地震记录逐次比对,当两类记录之间的差异达到指定值时结束迭代。这种算法流程清晰、操作便捷、迭代过程稳定,不仅能保证反演结果符合实际地质条件,还能有效表征孔隙压力参数的空间结构性与随机性,同时反演结果具有较高分辨性。

随机反演技术的关键是合理选取随机模拟方法并建立待优化的孔隙压力数据模型,其从孔隙压力区域化变量的随机函数中抽取多个能反映压力变量空间分布的、等概率的、可选的空间数据体,其最大特点是能重复再现区域化变量真实值离散性、波动性的程度,而并不优先考虑局部的插值精度。前期统计分析表明,孔隙压力变量基本符合高斯分布,而地震反演需要逐道顺序进行,因此在孔隙压力反演中适于采用序贯高斯模拟算法。

针对孔隙压力地震反演的实际问题,以地质统计理论为指导,形成了具体的反演算法:①提取覆盖待预测井段的叠后地震记录,运用地球物理方法对其时深转换,将其作为目标区域;②利用测井数据计算目标区域内完钻井的孔隙压力数据,将其作为随机模拟的初始条件值;③对于选定的三维地震数据进行逐道处理,每道按从浅至深的顺序随机模拟孔隙压力;④利用初始条件值确定当前待模拟地震道的累积条件分布函数。对于序贯高斯模拟方法,孔隙压力随机变量服从正态分布,其概率密度为:

$$f(x_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \exp\left[-\frac{(x_p - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right] \quad (9)$$

根据随机模拟原理,在条件值约束下,待模拟孔隙压力变量的累积条件分布函数具有条件期望与其克里金估计值一致和条件方差就是克里金估计方差的特点;⑤随机地从累积条件分布函数中按概率随机选取一个分位数作为该深度点的压力模拟值;⑥重复以上步骤,直到本地震道上的所有点全部完成模拟;⑦根据本次模拟得到的该道压力值计算合成地震记录,并将其与本道实际地震记录比对;⑧计算合成与实际地震记录差值平方和,当其小于指定值时,可以认为本道反演结束,当前压力模拟值即为本道压力反演结果,否则回到

步骤⑤重新迭代计算;⑨完成一道反演后,将该道压力反演结果并入初始条件值供下步计算使用,在孔隙压力反演计算过程中,如目标区域内覆盖 k 个地震道,就要确定 k 次累积条件分布函数,即:

$$F_{C_j}(x_p) = \text{Prob}\{p_p \leq x_p\} \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (10)$$

式(10)中的累积条件分布函数可基于式(8)计算得到, x_p 在其中即为从 p_p 的分布函数中随机提取的分位点;⑩对于目标区域内的其他地震道,根据步骤⑧依次进行压力反演。上述过程中相关地质统计模型的建立方法可参阅文献[19,20]。

2.2 地应力、岩石强度、坍塌压力及破裂压力的计算

在反演得到钻头前方地层的孔隙压力之后,还要求取相应层段的地应力与岩石强度,才可以根据上述参数预测得到井壁坍塌压力与破裂压力并最终确定安全钻井液密度窗口。这个过程相对比较容易,首先基于反演得到的孔隙压力,利用式(1)、式(2)求得相应层段的纵波速度,有了这个关键参数,就可以利用目前比较成熟的岩石力学模型,直接计算出待预测井段的地应力与岩石强度参数。

常用的地应力计算模型很多,其适应性取决于工区的构造地质状况,其中构造应力系数的选取非常关键,在应用钻井液密度窗口随钻预测技术时,建议采用基于实钻资料的实时反演方法^[15]。钻井液密度窗口分析中关键的岩石强度参数包括黏聚力、内摩擦角、抗拉强度等,岩石力学实验结果表明,以上参数与声速存在良好的相关性,可以建立经验公式利用声速直接计算岩石强度。

从岩石力学角度分析,造成井壁坍塌或破裂的原因主要为井内液柱压力偏低或较高,导致井壁围岩所受应力超过岩石抗剪强度或抗拉强度,从而发生剪切或拉伸破坏而造成的。在通过上文介绍的方法已经预测得到孔隙压力、地应力、岩石强度的基础上,选用合理的岩石破坏准则就可以预测井壁坍塌压力与破裂压力,通过综合分析求取的孔隙压力、坍塌压力与破裂压力曲线,便可确定待钻井段的安全钻井液密度窗口。本节中所涉及各类岩石力学参数详细分析计算方法可参阅文献[21-23]。

2.3 随钻预测技术要点

文献[24]对岩石力学参数与地层三压力的随钻预测理论及相关技术方案做了详细介绍,其钻前和实钻中的总体操作流程与本文所提出的预测方法有一定相似之处。这里只对本方法在现场应用中所要求的一些特定操作步骤进行简要论述。

在目标井开钻之前,需要根据完钻资料求取工区内各邻井的孔隙压力数据,对孔隙压力进行分层地质统计数据分析,还需建立包括时深关系在内的地球物

理模型。在目标井的实钻过程中,根据钻进中新收集的录井、钻井、测井数据,对钻前时深关系模型进行修正更新,确定当前钻头钻遇的地质层系,实时调整井眼轨迹在地震剖面上的位置,同时对地震子波、建模条件数据库、地质统计参数做必要修正。按照工程需要选取钻头前方一定深度的待钻井段(一般为50~200 m,应与钻头处于同套地质层系),从分层地质统计模型库中抽取对应当前钻遇层系的某套模型,从中提取统计参数,运用2.1节提出的方法通过地震资料实时反演钻头前方目标井段的孔隙压力与波速,并进一步参照2.2节介绍的流程随钻预测待钻井段的地应力、岩石强度、坍塌压力、破裂压力、钻井液密度窗口,并可将预测成果应用于钻井液性能实钻优化中。

3 技术的现场应用

川东北 HB 探区属深井区,区内探井目的层埋深均超过5000 m,深井钻遇地质层系较多。须家河组以上为陆相碎屑岩地层,其上部地层胶结疏松,漏失频发,下部地层泥岩水敏性强,局部夹煤层,井壁失稳风险大,且高压发育,井控压力大。雷口坡组以下为海相碳酸盐岩地层,发育盐膏层,地层压力分布不均。由于勘探早期对该区井壁稳定特征掌握不准确、不全面,造成前期探井溢流、漏失、卡钻等复杂故障频繁发生。从

探区工程地质情况考虑,本文提出的方法在该探区进行试验应用有着很强的针对性。因此,充分收集了 HB 探区前期的钻井、测井、物探等资料,针对该探区各套陆相和海相层系,按照上文介绍的技术路线和计算方法随钻预测了待钻井全井段的钻井液密度窗口,并根据预测结果进行了钻井液性能实时优化。

H503 井和 H505 井是现场应用的 2 口试验井,2 口井各开次的开钻时间比较接近,因此集中应用了本方法。针对该地区全部 8 套地质层组(上沙溪庙组—飞仙关组)中共有的 17 套次级层段,按钻进顺序从浅至深依次预测得到全井段的孔隙压力、地应力、岩石强度等岩石力学参数数据体。在收集处理本探区叠后三维地震资料的基础上,利用 2.1 节所述方法反演得到地层孔隙压力数据体(图 1),图 1 是包含 2 口试验井的连井压力剖面,纵坐标为井深,压力大小通过图中左上角的色带进行区分。图 2 为利用 2.2 节所述方法预测得到的最大水平地应力剖面,图 2 中剖面位置与图 1 相同,图 1 和图 2 中的压力和应力数值分别折算为当量钻井液密度和地应力梯度的形式。需要说明的是,由于本次现场应用主要目的是验证算法和技术方案的适用性,所以选取的试验工区范围较大,在实钻应用中可有针对性地选择覆盖目标井段的局部地震数据体进行反演计算,以提高运算效率。

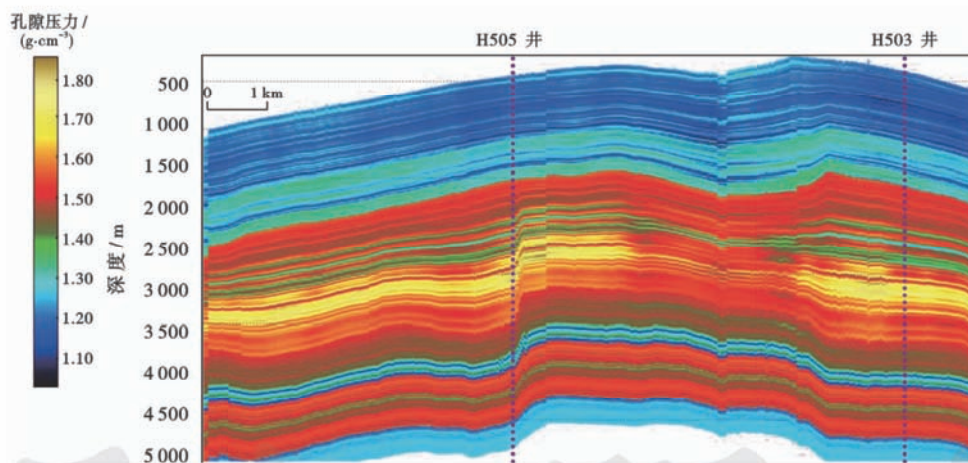


图 1 通过随机反演得到的孔隙压力预测剖面

Fig. 1 Pore pressure prediction profile obtained by stochastic inversion

实钻过程中根据试验井的实际井眼轨迹,从预测得到的孔隙压力、地应力、岩石强度数据体中提取试验井数据,进一步可随钻预测 2 口试验井各套钻遇层段的坍塌压力与破裂压力曲线(图 3、图 4)。为节约篇幅,在图 1—图 4 中,对各次随钻预测的各类压力剖面 and 曲线做了合并处理。在随钻预测得到的地层压力体系基础上,结合实际工程和地质状况,钻井过程中实时

预测了各套地层的安全钻井液密度窗口,并根据其及时优化调整了实际使用的钻井液密度及其他性能。表 1 将随钻预测得到的 HB 探区安全钻井液密度窗口进行了总结,并根据理论计算结果,结合实际工况,推荐了该区钻井各个开次的钻井液密度。

在试验井的实际钻进过程中,全面应用了上文所述的预测成果,同时还结合了钻井液体系及性能优化、

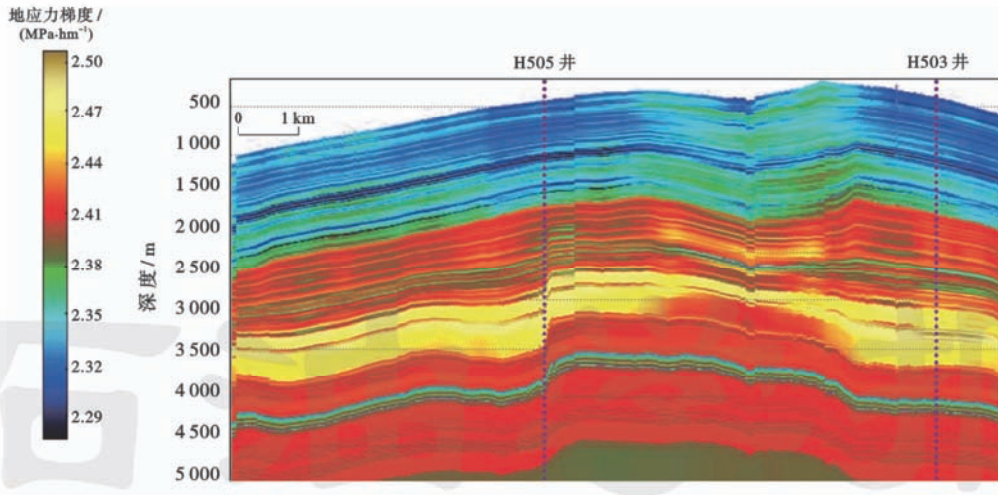


图 2 基于地震反演成果的最大水平地应力预测剖面

Fig. 2 Maximum horizontal in-situ stress prediction profile based on seismic inversion results

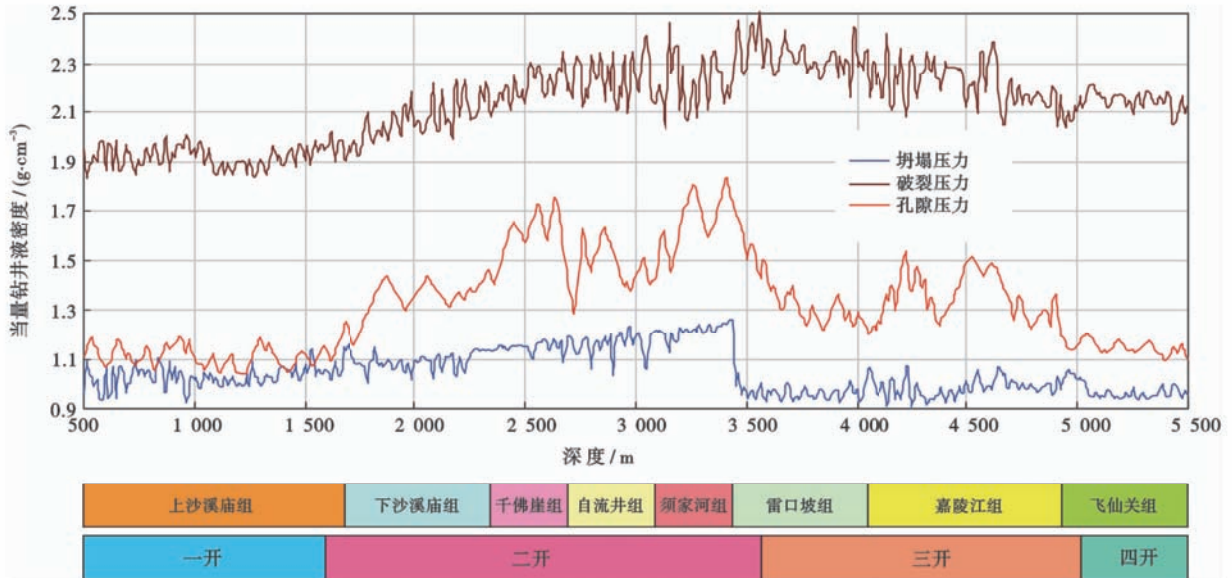


图 3 H503 井地层孔隙压力、坍塌压力及破裂压力预测曲线

Fig. 3 Pore pressure, collapse pressure and fracture pressure prediction curves of Well H503

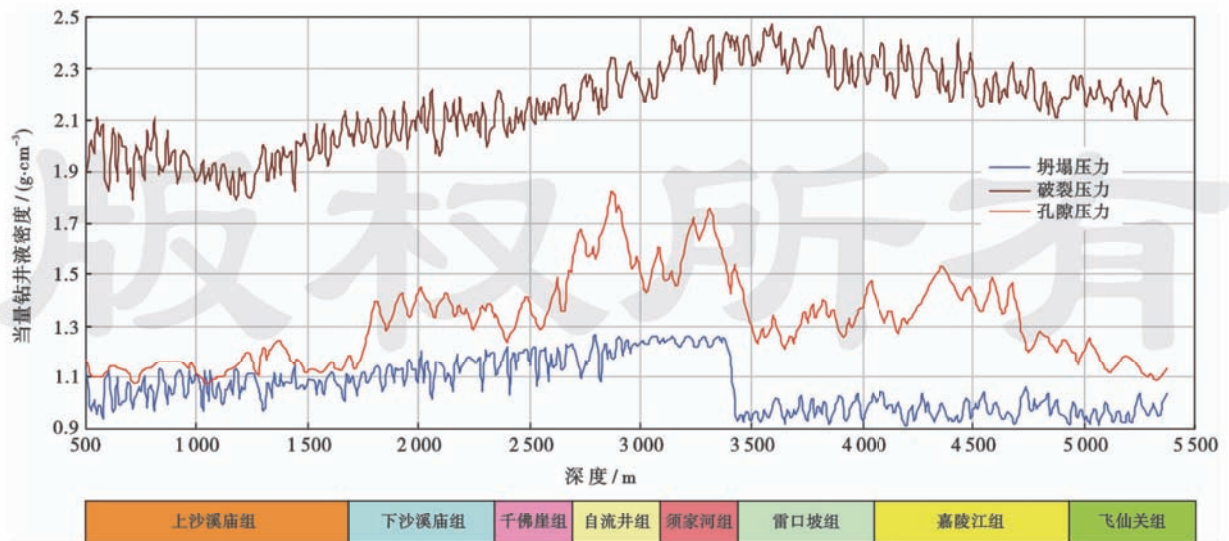


图 4 H505 井地层孔隙压力、坍塌压力及破裂压力预测曲线

Fig. 4 Pore pressure, collapse pressure and fracture pressure prediction curves of Well H505

表1 HB探区的安全钻井液密度预测窗口
Table 1 Predicted drilling fluid density windows of HB exploratory area

| 层位 | 安全钻井液密度窗口/(g·cm ⁻³) | 开次 | 实际钻井液密度/(g·cm ⁻³) |
|-------|---------------------------------|----|-------------------------------|
| 上沙溪庙组 | 1.21~1.82 | 一开 | 1.23~1.29 |
| 下沙溪庙组 | 1.48~1.87 | | |
| 千佛崖组 | 1.76~1.97 | 二开 | 1.39~1.91 |
| 自流井组 | 1.83~2.05 | | |
| 须家河组 | 1.84~2.03 | | |
| 雷口坡组 | 1.55~2.10 | 三开 | 1.47~1.60 |
| 嘉陵江组 | 1.53~2.06 | | |
| 飞仙关组 | 1.25~2.05 | 四开 | 1.32~1.37 |

钻头及钻井水力参数优选等技术,2口井各套地层的钻井施工总体较为顺利。钻后的电阻率测井数据表明,H503井和H505井的易垮塌层段(沙溪庙组—须家河组)的平均井径扩大率为4.97%,与未使用本技术的井区前期已完钻的3口邻井数据对比,同比减少60.51%,这说明随钻预测的安全钻井液密度窗口是可靠的。进一步统计钻井资料,2口井的平均机械钻速为2.00 m/s,与前期邻井同比增加26.58%,试验井的平均钻井周期则同比降低29.25%,同时试验井的平均井漏发生次数同比减少62.17%,以上情况表明基于随钻预测方法的钻井液密度合理优化在提高钻井效率方面发挥了一定的作用。

为了进一步验证预测精度,在2口试验井完井测试之后,系统收集了其现场实测数据,同时也获取了部分岩心资料用于岩石力学实验测试,并将试验井的实测数据与对应的预测数据进行了对比(表2),其中实测孔隙压力和破裂压力来自于现场试验资料,实测地应力通过实验室内岩心实验测得。由表2可见,各参数的预测精度均在93%以上,基本可以满足工程要求。通过查阅邻井的钻井地质设计中基于地震层速度预测的破裂压力和孔隙压力数据,发现其压力整体预测精度约为84%,和表2中利用本文新方法预测的压

表2 试验井预测和实测数据对比
Table 2 Comparison of predicted and measured data of test wells

| 井号 | 深度/m | 对比参数 | 实测密度值/(g·cm ⁻³) | 预测密度值/(g·cm ⁻³) | 预测误差/% |
|------|------|---------|-----------------------------|-----------------------------|--------|
| H503 | 5076 | 破裂压力 | 2.29 | 2.16 | 5.68 |
| H503 | 3157 | 孔隙压力 | 1.60 | 1.53 | 4.37 |
| H503 | 5311 | 孔隙压力 | 1.18 | 1.10 | 6.78 |
| H503 | 5029 | 最大水平地应力 | 2.35 | 2.43 | 3.40 |
| H505 | 4835 | 破裂压力 | 2.23 | 2.13 | 4.48 |
| H505 | 3268 | 孔隙压力 | 1.64 | 1.58 | 3.66 |
| H505 | 4951 | 孔隙压力 | 1.15 | 1.21 | 5.22 |
| H505 | 5303 | 孔隙压力 | 1.20 | 1.12 | 6.67 |

力精度对比,证明了随钻预测方法在计算精度上的优越性。实钻应用还表明,该方法在安全钻井液密度窗口随钻预测中,参数反演速度较快,计算过程稳定,操作简单便捷,具备了在现场进行全面推广应用的價值。

4 结论

(1) 基于地震记录、岩石物理参数与孔隙压力之间的定量关系,可运用非线性最优化方法直接反演孔隙压力,进而随钻预测待钻井段的各类岩石力学参数和安全钻井液密度窗口,现场应用表明该方法相比传统技术在随钻综合预测能力上有明显提高。

(2) 根据岩石力学参数的地质统计性质,可运用随机地震反演方法预测地层孔隙压力,不仅能合理控制反演计算误差,还可有效表征压力参数的空间结构性与随机性等统计特征。

(3) 随钻预测技术的关键点是在钻进过程中利用录井、钻井等实钻资料,对钻前建立的时深关系、地质统计等模型进行实时修正,校正井眼轨迹在地震剖面上的位置,并将其应用于孔隙压力、地应力、岩石强度等关键钻井地质参数的随钻预测。

符号注释: v_p —纵波传播速度,km/s; p_c —垂直有效应力,MPa; α —有效应力系数,无量纲; p_p —地层孔隙压力,MPa; σ_v —上覆地层压力,MPa; ϕ —孔隙度,无量纲; V_{sh} —泥质含量,无量纲; C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 —模型经验系数,无量纲; v_s —横波传播速度,km/s; $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ —模型经验系数,无量纲; ρ —地层密度,g/cm³; A_1, A_2 —模型经验系数,无量纲; r_i —第*i*个地层界面的反射系数,无量纲; ρ_i —第*i*个地层界面的密度,g/cm³; v_i —第*i*个地层界面的波速,km/s; i —序列变量编号; s —地震记录序列; w —地震子波序列; r —反射系数序列;*—褶积运算符; n —地震记录个数; m —反射系数个数; x_p —表征孔隙压力随机变量的自变量; μ_p —孔隙压力随机变量的均值; σ_p^2 —孔隙压力随机变量的方差; $F_{C_j}(x)$ —用于第*j*个地震道上孔隙压力变量随机模拟的累积条件分布函数;Prob(\cdot)—概率函数; j —待反演地震道的编号; k —待反演地震道数。

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] Zohreh M, Junin R, Jeffreys P. Evaluate the borehole condition to reduce drilling risk and avoid potential well bore damages by using image logs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineer-

- ing, 2014, 122: 318-330.
- [3] 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.
- [4] 卢运虎, 陈勉, 袁建波, 等. 各向异性地层中斜井井壁失稳机理 [J]. *石油学报*, 2013, 34(3): 563-568.
Lu Yunhu, Chen Mian, Yuan Jianbo, et al. Borehole instability mechanism of a deviated well in anisotropic formations [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(3): 563-568.
- [5] Zhang Jincai. 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] 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.
- [7] 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 Xudong. Study on prediction for borehole stability before drilling [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(3): 96-99.
- [8] 金衍, 陈勉, 杨晓奇. 利用层速度钻前预测安全泥浆密度窗口研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(14): 2430-2433.
Jin Yan, Chen Mian, Yang Xiaoqi. Prediction of safe mud density window by interval velocity before drilling [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(14): 2430-2433.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 吴超, 刘建华, 张东清, 等. 基于地震波阻抗的预探井随钻井壁稳定预测 [J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(3): 390-395.
Wu Chao, Liu Jianhua, Zhang Dongqing, et al. A prediction of borehole stability while drilling preliminary prospecting wells based on seismic impedance [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(3): 390-395.
- [12] 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.
- [13] 吴超, 陈勉, 金衍. 井壁稳定性实时预测方法 [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.
- [14] 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: Edition of Natural Science*, 2007, 31(6): 141-146.
- [15] 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 Haifeng, Chen Mian. Real-time prediction of borehole instability based on actual drilling data [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(2): 324-328.
- [16] 樊洪海. 适于检测砂泥岩地层孔隙压力的综合解释方法 [J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(1): 90-92.
Fan Honghai. A new integrated pore pressure evaluation method for shale-sand formations [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(1): 90-92.
- [17] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
Yuan Yaxiang, Sun Wenyu. *Optimization theory and method* [M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [18] 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 Handong, Zhang Ruwei, Wei Shiping. Research on application of seismic nonlinear random inversion to reservoir prediction in the thin sandstone of continental deposits [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(3): 386-390.
- [19] 吴胜和. 储层表征与建模 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
Wu Shenghe. *Reservoir characterization & modeling* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [20] 林承焰, 陈仕臻, 张宪国, 等. 多趋势融合的概率体约束方法及其在储层建模中的应用 [J]. *石油学报*, 2015, 36(6): 730-739.
Lin Chengyan, Chen Shizhen, Zhang Xianguo, et al. Probability constraint method based on multiple trend integration and its application in reservoir modeling [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(6): 730-739.
- [21] 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. *Rock mechanics in petroleum engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [22] 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.
- [23] 宋连腾, 刘忠华, 李潮流, 等. 基于横向各向同性模型的致密砂岩地应力测井评价方法 [J]. *石油学报*, 2015, 36(6): 707-714.
Song Lianteng, Liu Zhonghua, Li Chaoliu, et al. Geostress logging evaluation method of tight sandstone based on transversely isotropic model [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(6): 707-714.
- [24] 吴超, 臧艳彬, 张东清, 等. 定向井随钻井壁稳定预测方法及其应用 [J]. *石油学报*, 2015, 36(10): 1290-1298.
Wu Chao, Zang Yanbin, Zhang Dongqing, et al. A method of borehole stability prediction while drilling directional wells and its application [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(10): 1290-1298.