

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2018.03.008

塔中地区碳酸盐岩地层压力监测应用研究

邓 嵩,夏一程,赵虹宇,刘 成,窦祥骥,曹文科

(常州大学 石油工程学院,江苏 常州 213016)

摘要:塔中地区目的层属于碳酸盐岩层,运用现有的地层压力计算方法得出的结果不准确。从 Sigma 录井指数法监测地层压力机理出发,根据顺南区块钻遇碳酸盐岩目的层时,高钻速、高压耗对岩石抗钻强度的影响,对 Sigma 指数计算方法进行了修正,然后根据钻速方程中各个参数的关系,确定了顺南区块的地层压力监测方法。同时将此方法应用到顺南区块某典型井实例计算中,结果表明本计算方法适应于此区域的地层压力监测,与实钻情况相比,误差较小,并且比 Dc 指数法的计算精度平均可提升 19%,可以推广应用。

关键词:顺南区块;Sigma 录井法;碳酸盐岩;压力监测

中图分类号:O 621.3

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2018)03-0071-06

Application Study on Formation Pore Pressure Monitoring of Carbonate in Middle Tarim

DENG Song, XIA Yicheng, ZHAO Hongyu, LIU Cheng, DOU Xiangji, CAO Wenke

(School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

Abstract: The main strata of Shunnan district of middle Tarim is carbonate layers, and the pore pressure based on the present monitoring and predicting method is not correct. Based on the principle of Sigma logging, the Sigma index is corrected on the basis of the drilling rate and the high loss of pressure. Then the pore pressure monitoring method of Shunnan district is obtained by the correcting of the parameters of drilling rate equations. Meanwhile, the method in this paper is used in the typical well in Shunnan district. The results shows that, the calculation method presented in this paper is more applicable in this district. Compared with the real drilling situation, there are smaller errors, and the results of the method is 10% more accurate than Dc method, which indicates that the method can be promoted.

Key words: shunnan district; Sigma log method; carbonate; pressure monitoring

收稿日期:2018-01-10。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574261)。

作者简介:邓嵩(1989—),男,河南南阳人,博士,讲师。E-mail: dunsun@foxmail.com

引用本文:邓嵩,夏一程,赵虹宇,等.塔中地区碳酸盐岩地层压力监测应用研究[J].常州大学学报(自然科学版),2018,30(3):71-76.

塔中地区顺南区块目的层埋藏深,属于碳酸盐岩地层,具有孔隙度大,钻井过程中易发生漏失等特点,常用的地层压力计算方法不准确,影响钻井工程进度。Eaton 法、Dc 指数法等进行计算地层压力都难以对钻井工程进行有效的指导与支持,所以有必要对此区块的地层压力计算方法进行研究、分析。

以往研究表明,碳酸盐岩属于化学沉积岩,成岩作用复杂,表现出明显的非均质性和各向性^[1-4]。

碳酸盐岩异常地层压力成因不同于碎屑沉积岩的欠压实机制,其纵波速度—孔隙度关系分散,传统压力预测方法基于欠压实理论^[5],采用常规方法进行碳酸盐岩地层压力预测具有很大的不确定性。而 Sigma 录井法是 AGIP 公司的 Bellotti 和法国地质服务公司的 Gerard 于 1976 年提出来的一种监测异常地层压力的方法^[6],它不但适用于以泥页岩为主的地层,而且也适用于岩性复杂的地层^[7]。

本文基于 Sigma 录井原理,通过顺南区块实钻情况压耗大、钻速快特征,结合孔隙度对 Sigma 指数的影响等,修正了 Sigma 监测模型,使之适用于顺南区块的地层压力监测。

1 Sigma 录井监测碳酸盐岩地层压力模型

1.1 Sigma 指数法

已有研究表明,岩石的抗钻强度可由 2 个方程表示^[8]:

$$R = \left(\frac{H}{\sqrt{\sigma_1}} \right)^N \frac{W}{D_b} \quad (1)$$

$$\sqrt{\sigma_1} = \frac{W^{0.5} N^{0.25}}{D_b R^{0.25}} \quad (2)$$

式中: $\sqrt{\sigma_1}$ 为岩石抗钻强度,即 Sigma 指数; H 为井深, m; D_b 为钻头直径, mm; W 为钻压, T; N 为转速, r/min; R 为机械钻速, m/h。

在正常地层压实条件下,通常采用回归法建立正常趋势线^[9]

$$\sqrt{\sigma_2} = a \frac{H}{1\ 000} + b \quad (3)$$

式中: $\sqrt{\sigma_2}$ 为 Sigma 曲线的正常趋势; a 为正常趋势线斜率; b 为正常趋势线截距,即当深度等于零时的 $\sqrt{\sigma_2}$ 值。

进而利用 Sigma 指数正常趋势线与计算得到的值比较,可以计算地层孔隙压力当量密度,即

$$\rho_p = \rho_m + (\sqrt{\sigma_2} - \sqrt{\sigma_1})^a$$

此时 $\sqrt{\sigma_1}$ 并不能正确反映异常地层压力地层,邓兴德等对 $\sqrt{\sigma_1}$ 指数做了以下校正^[10]。

1) 深度校正

$$\sqrt{\sigma_1'} = \sqrt{\sigma_1} + 0.028 \left(7 - \frac{H}{1\ 000} \right) \quad (4)$$

2) 岩石总强度校正

$$\sqrt{\sigma_1'} [(0.1W)^{0.5} T^{0.25} N^{0.25}] / (0.393\ 7 D_b) \quad (5)$$

3) 岩屑对岩石强度的影响校正

$\sqrt{\sigma_1'} > 0.75$, 说明有岩石重复切削现象; $n = (4 - 0.75 / \sqrt{\sigma_1'})$; 反之, 无重复切削 $\sqrt{\sigma_1'} < 0.75$, $n = 3.25 / (640 \sqrt{\sigma_1'})$ 。

从而得到考虑对岩石强度的影响系数

$$F = 1 + 1 / (10 S^{0.2}) + [(1 + 103.98 n^2 \Delta p^2)^{0.5} - 1] / (10.197 n \Delta p) \quad (6)$$

式中: T 为钻时, h ; ρ_m 为钻井液密度, g/cm^3 ; S 为钻头的进尺数, m ; ρ_p 为正常地层孔隙压力当量密度, g/cm^3 。 Δp 为钻井液柱静水压力与地层孔隙压力之间的压差,关系式为

$$\Delta p = (\rho_m - \rho_n) \frac{h}{10} \quad (7)$$

式中: ρ_n 为正常地层压力梯度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; Δp 的单位为 10^5Pa 。

但是此方法对塔中地区顺南区块的碳酸盐岩目的层压力监测并不精确,需要进行修正,以得出适应于顺南区块的地层压力监测方法。

1.2 适应于顺南区块的 Sigma 指数计算方法修正

上述方法是按照牙轮钻头为标准建立的监测地层压力模式,而在塔中地区目的层,目的层一般用PDC钻头进行钻进,存在高钻速、高压耗的情况,进行地层压力监测时,其计算值与实际值误差很大,同时其岩石强度曲线也会发生偏移。

本文依据碳酸盐岩层的PDC钻头钻井参数所表征的地层的岩石强度变化情况与地层压力之间的相互影响的规律,提出一种修正的Sigma指数修正模型,其计算模式如下。

1) 高钻速对岩石强度的影响

钻速和钻压的大小对岩石强度有影响,现场录井资料表明,在顺南区域的碳酸盐岩目的层经常出现高钻速的情况,已有学者对高钻速下的Sigma录井岩石强度进行了修正^[11]:

当 $\sqrt{\sigma_1'} > 1$,高钻压,低钻速, $n = (4 - 0.75/\sqrt{\sigma_1'})$;当 $\sqrt{\sigma_1'} \leq 1$,低钻压,高钻速, $n = 3.25/(640\sqrt{\sigma_1'})$ 。

2) 高循环压耗对岩石强度的影响

在顺南地区碳酸盐岩目的层钻进时,产生了较高的循环压耗,与上部常规岩层有很大的区别。依据岩石破碎能量规律^[12],钻进时钻头的动能和射流冲击能量将转化成能量破碎岩石以及维持原有钻具动能同时存在部分能量的耗散。所以,岩石的破碎能量与钻井压耗和泵的排量有关系。Sigma录井法需要校正岩石强度,依据岩石破碎能量规律,钻头的动能以及排量和水力能量与岩石强度有关,具体表现为环空压耗和泵排量与之有关,结合已有研究^[13],其关系可表示为

$$\sqrt{\sigma_1'} = e^{(0.1\rho_m - \rho_p)H + K_a Q^{1.8}} \sqrt{\sigma_1} \quad (8)$$

式中: K_a 为环空压耗系数; Q 为泵的排量, L/min 。

3) 计算结果修正

由于式(7)中压差 Δp 为正常地层压力梯度与净水压力梯度的差值,如果用其计算得出的结果并不准确,所以对压差 Δp 进行修正, $\sqrt{\sigma_1'}$ 为加入影响系数后修正的岩石强度,依据式(6),通过经验计算可知, $\sqrt{\sigma_1'}$, Δp 和 n 关系为

$$\Delta p = \frac{2(1 - \sqrt{\sigma_2}/\sqrt{\sigma_1'})}{1 - (1 - \sqrt{\sigma_2}/\sqrt{\sigma_1'})^2} \frac{1}{n} \quad (9)$$

令 $\sqrt{\sigma_2}/\sqrt{\sigma_1'} = y$,则

$$\Delta p = \frac{2(1 - y)}{1 - (1 - y)^2} \frac{1}{n} \quad (10)$$

代入式(7)即可得到地层压力当量密度。

2 塔中地区实例井计算对比分析

2.1 实例井数据

顺南某井位于顺南区块中部,附近有五口已钻探井,此井在五开时钻井过程中钻遇高压层,6 700m 左右钻到碳酸岩层,有气测显示,同时加大钻井液密度至 $2.0\sim 2.2\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 之间,但是发生漏失现象。在井深7 500m处开始,循环压耗增加,钻速增快迅速,此时钻井液密度达到 $2.2\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。为了进一步监测地层孔隙压力,确定准确的钻井液安全密度窗口,对其录井参数进行提取,如图 1 所示。

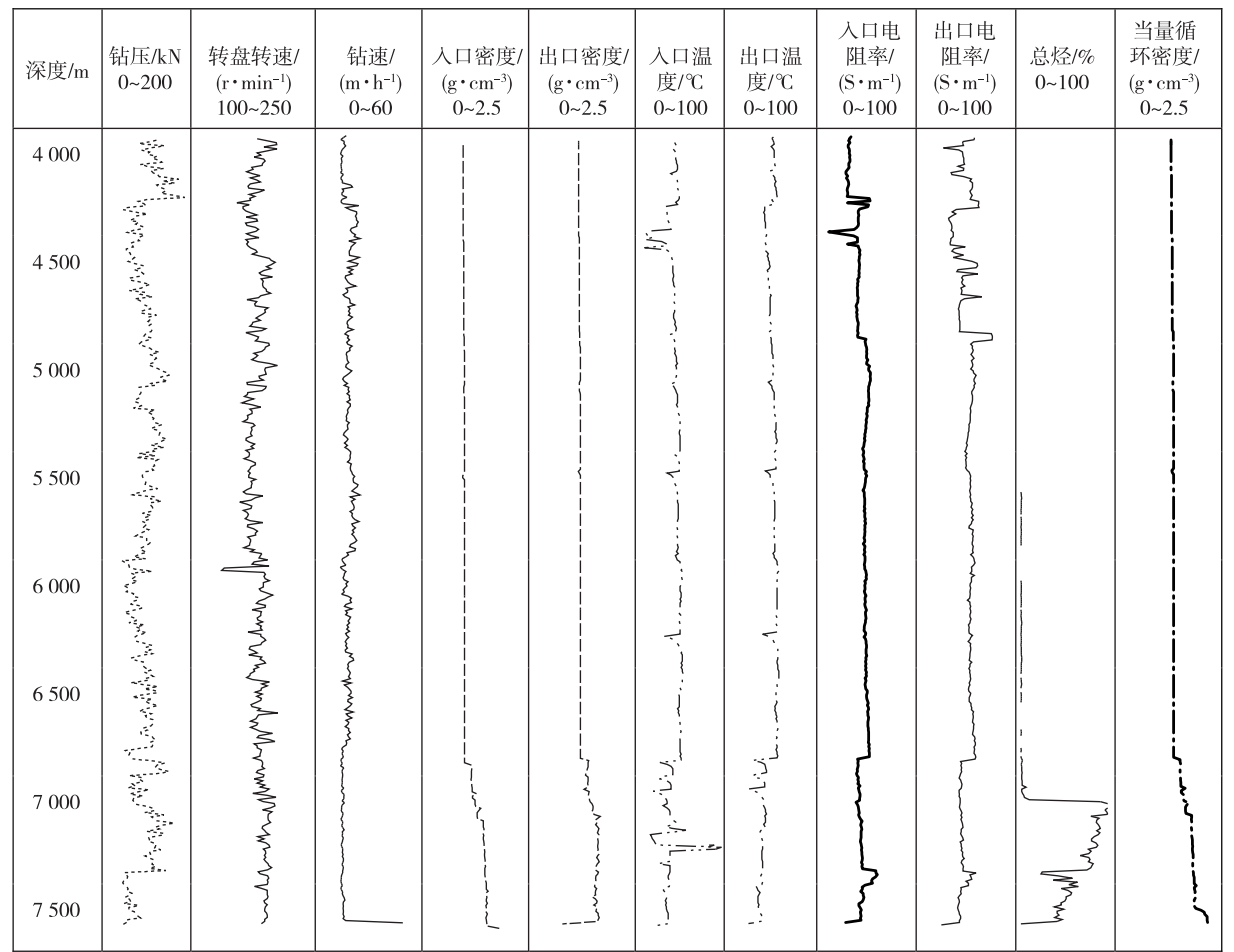


图 1 顺南某井 Sigma 录井数据提取

2.2 计算结果

经过试算,结果与实钻情况差距过大,通过研究分析,运用本文方法进行地层压力计算,得到整个井段的地层压力监测数据,如图 2 所示。

由图 2 可以看出,地层压力计算结果与实钻情况吻合度较高。6 700m 之前地层压力变化并没有异常;在6 700m 后,达到目的层位,Sigma 指数增大,地层压力增加,此时总烃显示变大,温差也发生改变;但在7 200~7 500m 高压更加明显,地层压力当量密度达到 $2.0\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 左右,同时在此层位中,温度差变化较大,总烃显示有变小趋势,电阻率基本不变,孔隙度此时变化也不大,但是随钻显示漏失量变大,说明钻

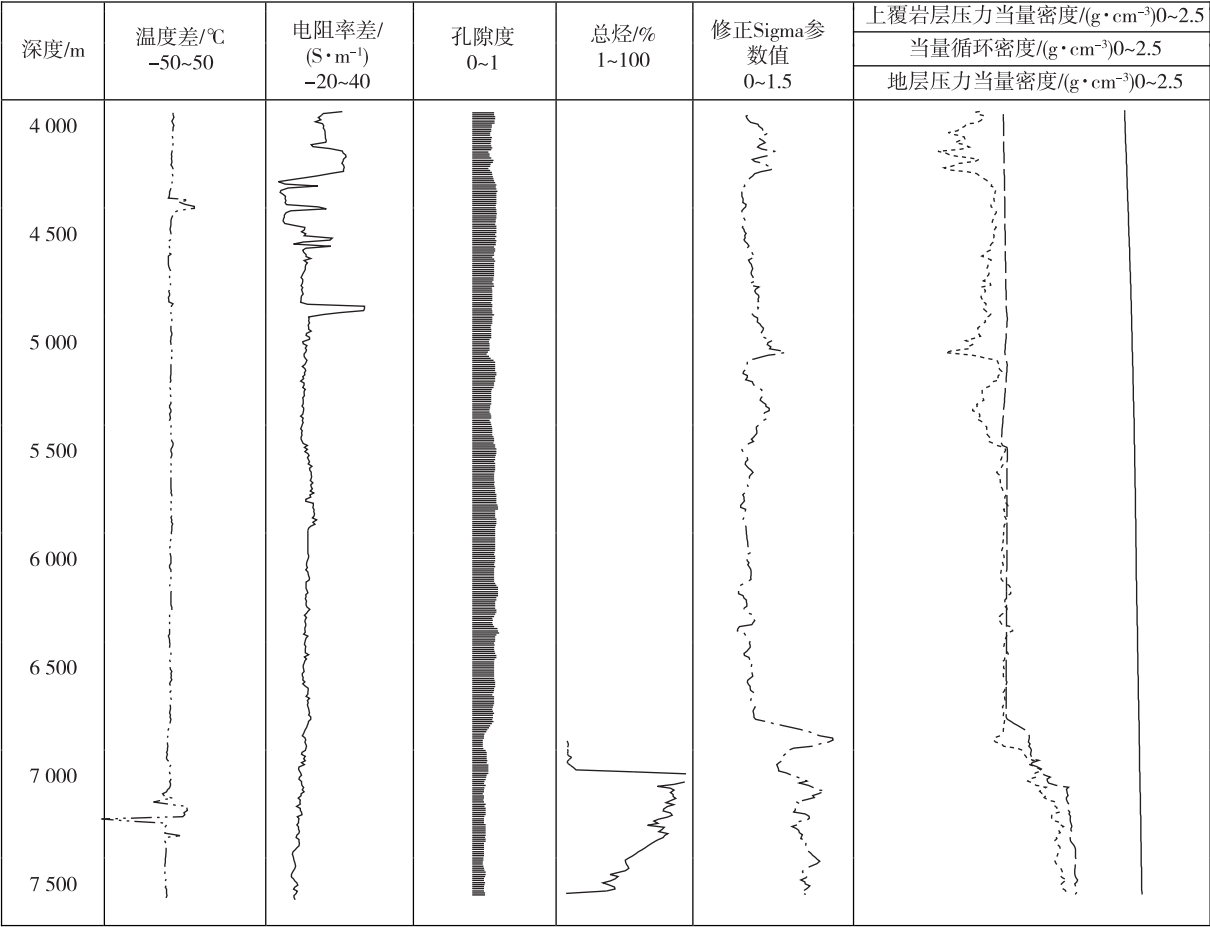


图 2 顺南某井修正 Sigma 法监测地层压力结果

遇碳酸盐岩层位,地质构造复杂化,7 500m 后地层压力还有升高趋势,此时应加大钻井液密度。

2.3 对比分析

为了验证本文方法的准确性,将本文计算结果与 Dc 指数法进行比较,如图 3、图 4 所示。

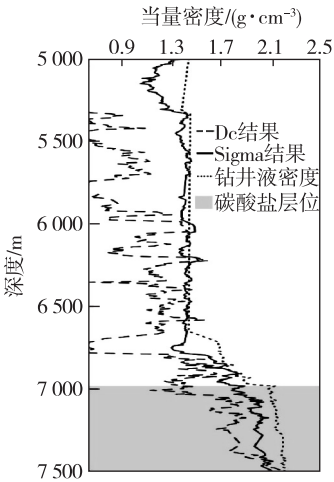


图 3 修正 Sigma 指数法与 Dc 指数法地层压力计算结果对比

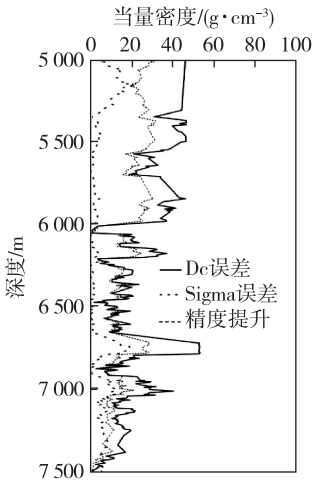


图 4 修正 Sigma 指数法与 Dc 指数法地层压力监测结果误差对比

从图 3 中可以看出,在 7 000m 以上地层中,Dc 指数法计算结果偏小,在 6 000~6 500m 井深处与修正 Sigma 指数法结果相差不大,原因是在 5 000m 以下地层钻头使用的是 PDC 钻头。在 7 000m 以下可以看出,当钻到碳酸盐岩层位时,本文的修正 Sigma 指数计算结果与实钻钻井液密度更为接近。统计结果如图 4 所示,经过计算,使用修正 Sigma 方法后,整个目的层井段的地层孔隙压力计算精度平均提升了 19%,说明本文方法可以对此区域进行地层压力监测应用。

3 结 论

根据塔中地区顺南区块的实钻情况,对高钻速下的岩石强度进行了修正,并且依据岩石破碎能量规律对高压耗下的岩石强度进行了修正,最后对异常压力下的岩石强度影响系数进行了修正,建立了适用于塔中地区碳酸盐岩地层压力 Sigma 录井指数法计算模型,并且根据顺南某井的计算结果对其进行了分析与对比。结果表明:修正 Sigma 指数法适应于塔中地区顺南区块的碳酸盐岩地层压力计算,与 Dc 指数法相比,计算精度平均可提升 19%;钻井过程中的高钻速影响岩石的抗钻强度,对 Sigma 指数计算结果有影响;循环压耗的精确确定影响顺南区块碳酸盐岩地层压力监测结果,特别是目的层位的地层计算;碳酸盐岩地层压力确定是钻井工程设计的难点,此研究只是对其进行了部分探索,后续应该关注孔隙结构等因素对地层压力造成的影响。

参考文献:

- [1] ATASHBARI V, TINGAY M R. Pore pressure prediction in carbonate reservoirs[C]. Mexico City: Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [2] 王子振, 王瑞和, 单珣, 等. 常规方法预测碳酸盐岩地层压力的偏差分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(5): 96-101.
- [3] EBERLI G P, BAECHE G T, ANSELMETTI F S, et al. Factors controlling elastic properties in carbonate sediments and rocks[J]. The Leading Edge, 2003, 22(7): 654-660.
- [4] 刘常红, 陈志海. 塔河碳酸盐岩油藏产量递减特征与影响因素分析[J]. 特种油气藏, 2010, 17(6): 72-74.
- [5] 樊洪海. 测井资料检测地层孔隙压力传统方法讨论[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(4): 72-74.
- [6] MAZZONI R, WAHDAN T, BASSEM A, et al. Real-time pore and fracture pressure prediction with FEWD in the Nile Delta[C]. Amsterdam: Society of Petroleum Engineers, 1997.
- [7] 王志战, 秦黎明, 李启波, 等. 碳酸盐岩地层异常压力随钻监测关键问题探讨——以川东北飞仙关组和长兴组地层为例[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 14-19.
- [8] GYLLENSTEN A, AL-ARFI S, AL-HAMMADI M, et al. Advances in LWD sigma measurements and application to real-time formation evaluation in carbonate reservoirs [C]. Houston: Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 2009.
- [9] 邓兴德, 潘卫国, 陈榕, 等. 用修正的西格玛法预测使用 PDC 钻头时的地层压力[J]. 钻采工艺, 1995, 18(2): 19-23.
- [10] 吴建忠, 王波, 李强, 等. 随钻地层压力监测技术在川西地区的应用[J]. 石油地质与工程, 2009 (4): 82-84.
- [11] 朱礼平, 王希勇, 严焱诚. 川西地区地层压力随钻监测方法应用[J]. 天然气技术, 2009, 3(2): 37-39.
- [12] 闫铁, 李玮, 毕雪亮, 等. 旋转钻井中岩石破碎能耗的分形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S2): 3649-3654.
- [13] 李玮, 闫铁, 毕雪亮, 等. 实钻条件下破碎能耗的分形评价方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(6): 76-79.

(责任编辑:殷丽莉)