

文章编号: 0253-9985(2011)01-0150-07

速度谱法孔隙流体压力预测技术在塔河油田的应用

朱 定, 李宗杰, 付童童

(中国石化 西北油田分公司 石油勘探开发研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 分析了地层压力异常形成原因, 介绍了测井曲线预测地层压力等效深度法和 Fillippone 速度谱预测地层压力原理。给出了两种预测结果与 MDT 测试压力对比数据。测井声波时差曲线预测地层压力在塔河油田托浦台工区应用表明, 该区地层压力系数范围在 1.0~1.2, 属于正常压力系统; 速度谱预测地层压力与 MDT 测试压力最大误差为 5%, 而等效深度法预测误差最大达 15% 左右, 速度谱法比等效深度法预测地层压力具有更高精度和可靠性。研究认为, 利用地震处理速度谱法进行钻前压力预测, 可以预测大套地层压力变化趋势, 可以用来指导钻井泥浆密度设计, 为提高钻井效率和安全钻井提供技术支持。

关键词: 欠压实; 速度谱; 压力系数; 压力预测; 异常地层压力; 塔河油田。

中图分类号: TE121.1

文献标识码: A

Application of pore fluid pressure prediction by velocity spectrum to Tahe oilfield

Zhu Ding, Li Zongjie and Fu Tongtong

(Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC Northwest Oilfield Company, Urumqi Xinjiang 830011, China)

Abstract The reasons for anomalous pore pressure are analyzed in this paper. The methods of equivalent depth to predict pore pressure from well logging data and Fillippone's formula based on seismic velocity are introduced and compared with the results from MDT pressure data. The results of prediction of pore pressure from well sonic data in the Tahe oilfield TPT area shows that this area pressure coefficient change from 1.0 to 1.2, can be classified as normal pressure system. The maximum error between MDT and predicted pore pressure by Fillippone's formula reaches 5%, as predicted pore pressure by equivalent depth method reaches 15%, so Fillippone's formula has high precision and reliability than the equivalent depth method. This study shows that prediction of pore pressure using seismic velocity can predict the layer pressure which embodies the pressure change trend of a heavy layer and design the mud density before drill. It can also improve the drill productivity and approve the support for safe drill.

Key words abnormal compaction, velocity spectrum, pressure coefficient, prediction of pore pressure, anomalous formation pressure, Tahe oilfield

油气层的压力是油气层能量的反映, 是推动油气在储层中流动的动力。由异常高的流体压力造成的地层超压是油田勘探开发各阶段所要关注的问题, 它与一定的沉积环境有关, 一般表现为高孔隙率、低密度、低速度、低电阻率等特点。从 20 世纪 60 年代开始人们尝试进行地层

压力的预测, 但到目前, 这项技术仍然没有完全成熟。因此有必要对地层压力预测方法进行探讨和总结, 以保障油气勘探开发的安全性, 提高经济效益^[1]。

地层压力即孔隙流体压力的预测方法有两类: 一类是利用测井数据, 另一类是利用地震速度资

料。前者取得的结果精度较高、效果较好, 但是其结果不是真正意义上的预测, 此技术只能在钻井结束后应用, 并且对没有测井资料的井段和工区的地层压力是无法预测的; 后者由于很难获得准确的速度参数, 预测结果的精度及应用范围受到限制, 但由于其前瞻性和全局性, 成为钻前压力预测的主要手段之一。目前国内有多名学者专家对这两种方法进行了深入研究, 并取得了不错的应用效果^[26]。

塔河油田托浦台工区构造位置处于阿克库勒凸起的西南缘, 北东方向紧邻塔河油田主体区, 北西方向与哈拉哈塘凹陷相接, 南部毗邻顺托果勒隆起, 是塔河油田新开发的主力产油区。由于工区经过多期次构造运动, 其地层压力分布、成因及其与油气成藏间的构造格局复杂, 为油气田开发带来困难, 因此有必要对工区地层压力进行预测研究^[7-12]。

1 地层压力异常机理

1.1 欠压实作用引起的地层高压

在海洋沉积环境作用中, 沉积物初始是疏松的, 有很高的孔隙度和渗透性。因此孔隙空间中的水承受的压力与海平面相关, 固体相的重量由骨架支撑, 对流体的压力不会产生影响。孔隙中的流体压力由延伸到地表的水柱流体的静压力给出。沉积物中的孔隙压力近似等于流体静压力的情况称作正常压实。随着沉积物埋藏深度的增大, 上覆岩层重量增加, 作用在岩石颗粒上的压力使得岩石的孔隙度和渗透性降低。如果沉积的速度超过流体从孔隙空间中的排出速度, 或者在埋藏过程中由于封堵作用排水停止, 孔隙流体则变成超压状态。这种方式产生的超压是由于不平衡压实或者欠压实引起的, 是深水沉积物产生超压最常见的机制^[13]。

1.2 孔隙流体体积膨胀作用引起的地层高压

在水受热、油气生成、油裂解成气、蒙脱石向伊利石转化等因素影响下, 孔隙流体发生膨胀, 同时又被周围渗透性地层束缚, 引起地层压力升高。流体膨胀引起地层压力升高, 伴随着有效应力的减少, 孔隙度随之增大, 地层速度随之降低。此外还有构造作用、地层抬升、剥蚀等因素引起的地层高压。

地层欠压实可以引起有效应力不增加或者增加缓慢, 但不会引起有效应力的降低; 孔隙流体体积膨胀可以引起有效应力的降低, 进而导致速度曲线的倒转^[1, 14]。

塔河油田托浦台工区上部地层以泥岩、泥质粉砂岩为主, 下部地层以泥岩、泥质粉砂岩, 砂砾岩、含砾泥岩、含砾泥质粉砂岩为主。因此, 该地区异常压力成因机理应该是由欠压实作用造成的^[11]。

2 地层压力预测方法

Terzaghi 论述了地下饱和和多孔介质的应力平衡状态(图 1), 认为垂直上覆地层压力 S 是地层孔隙流体压力 P 和作用在岩石骨架上的垂直压力 σ 之和^[15]。垂直有效应力是地层压实成岩的主要因素。应力平衡方程:

$$S = P + \sigma \quad (1)$$

上覆地层的压力可以通过对地层密度的积分得到:

$$S = g \int_0^z \bar{\rho}(z) dz = \bar{\rho}gh \quad (2)$$

式中: g 为重力加速度, m/s^2 ; $\bar{\rho}$ 为平均密度, g/cm^3 ; $\bar{\rho}$ 可由 Garden 公式求取; h 为地层距离地表的垂直深度, m ; z 为深度, m 。

因此只要得到了垂直有效应力就能够确定地层孔隙压力。目前, 预测地层压力比较常用的方法有 Eaton 在 1972 年提出的等效深度法^[16]、Fillipponne 于 1979 年和 1982 年先后提出了用地震资料预测地层压力的方法^[17]和 Bowers 在 1995 年提出的测定有效应力的方法。

2.1 等效深度法

等效深度法原理: 对于正常压实的地层, 其

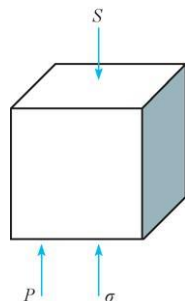


图 1 饱和和多孔介质应力状态

Fig. 1 State of stress of saturated porous medium

声波时差曲线上存在一条明显的压实趋势线。在不考虑地层温度的影响下,与超压带上任何一点测井参数相同处的正常压实趋势线上的点,其两点孔隙结构特征相同,压实程度相同,具有等效性,该点称为等效深度点(图 2)。超压带的垂直有效应力与其等效深度点上的垂直有效应力相等,而正常压实曲线上面的等效点的垂直有效应力等于由该点的上覆岩层压力减去该点静水压力。故地层压力计算公式:

$$P_a = S_a - (S_b - P_b)$$

(3)

式中: b 是 a 的等效深度点, P_b 为等效深度点上的流体压力,等于该点的静流体压力, MPa S_a , S_b 分别为 a , b 两点处的上覆岩层压力,可以通过式 (2) 算出, MPa

2.2 速度谱法

地震波在介质中的传播速度是有效应力和孔隙度的函数,因此可以通过地震层速度来计算有效应力,进而求出地层孔隙压力。地震速度预测地层孔隙压力的基本原理是在正常压实地层中,随着井深的增加,地层逐渐被压实,地层岩石的孔隙度逐渐减小,地震波在岩石中的传播速度逐渐加快。而在异常高压地层中,表现为与正常压实趋势相反的变化,孔隙度比正常压实的孔隙度大,岩石密度比正常压实密度值低,地震波波速比正常压实小。由此可知,利用地震波波速信息,有可能预测异常高压地层的存在,并可估算其压力的大小^[18]。

Fillippone在 1978 年和 1982 年通过对墨西哥

湾等地区的测井、钻井和地震等多方面资料的综合研究后,在假设地层孔隙压力和上覆岩层压力关系是与储层岩石的声波速度成比例的条件下,提出了不依赖正常压实趋势线的简单实用的计算公式,在包括墨西哥湾和北海等地的实际应用中取得了良好的效果。公式如下:

$$P = \frac{v_{max} - v_{int}}{v_{max} - v_{in}} S$$

(4)

$$v_{max} = 1.4v_0 + 3KT$$

(5)

$$v_{in} = 0.7v_0 + 0.5KT$$

(6)

$$K = \frac{v_{ms} - v_{ms0}}{T - T_0}$$

(7)

$$v_0 = v_{ms} - KT_0$$

(8)

式中: S 代表垂直上覆地层压力, MPa P 是地层孔隙流体压力, MPa V_{max} 为岩石孔隙度接近于零时的地层速度, m/s V_{in} 为地层孔隙流体速度, m/s V_{in} 为预测层段的层速度, m/s T , T_0 为预测层段底和顶面的双程旅行时 m/s V_{ms} , V_{ms0} 为时间 T , T_0 处的均方根速度, m/s

3 地层压力预测实际应用

3.1 速度谱法预测地层压力

地层压力预测方法不同,适用的范围也不同,对于油田钻井前压力预测,只能根据地震处理速度资料利用 Fillippone 速度谱法来估算地层不同深度的压力。利用该方法对塔河油田多口井进行了压力预测,下面以 W 33 井为例对压力预测结果进行分析。W 33 井位于阿克库勒凸起西南斜坡带,具有良好的油气运移和聚集的条件。根据邻区的 W 8 W 24, W 19 等井的实钻情况分析,二叠-石炭系压力系数偏高,奥陶系压力系数偏低,均属正常压力系统,部分井出现钻时加快、放空井漏现象。因此,精确预测地层孔隙流体压力和压裂压力对于钻井效率和使用最佳泥浆比重安全钻井至关重要。图 3 是由 W 33 井的速度谱根据 Fillippone 法预测得到的地层压力和压力系数(压力系数是地层压力与相同深度静水柱压力的比值)。由于速度资料谱点稀疏,频率低,因此纵向分辨率不高,预测的压力曲线(图 3b)光滑且随速度增加而增大,预测结果反映大套地层的压力趋势,预测的压力系数变化要较地层压力变化剧烈

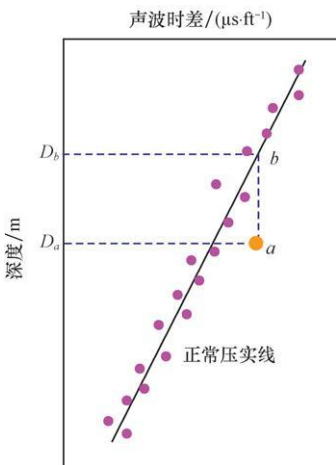


图 2 等效深度法压力预测图示

Fig 2 Prediction of pore pressure by the equivalent depth method

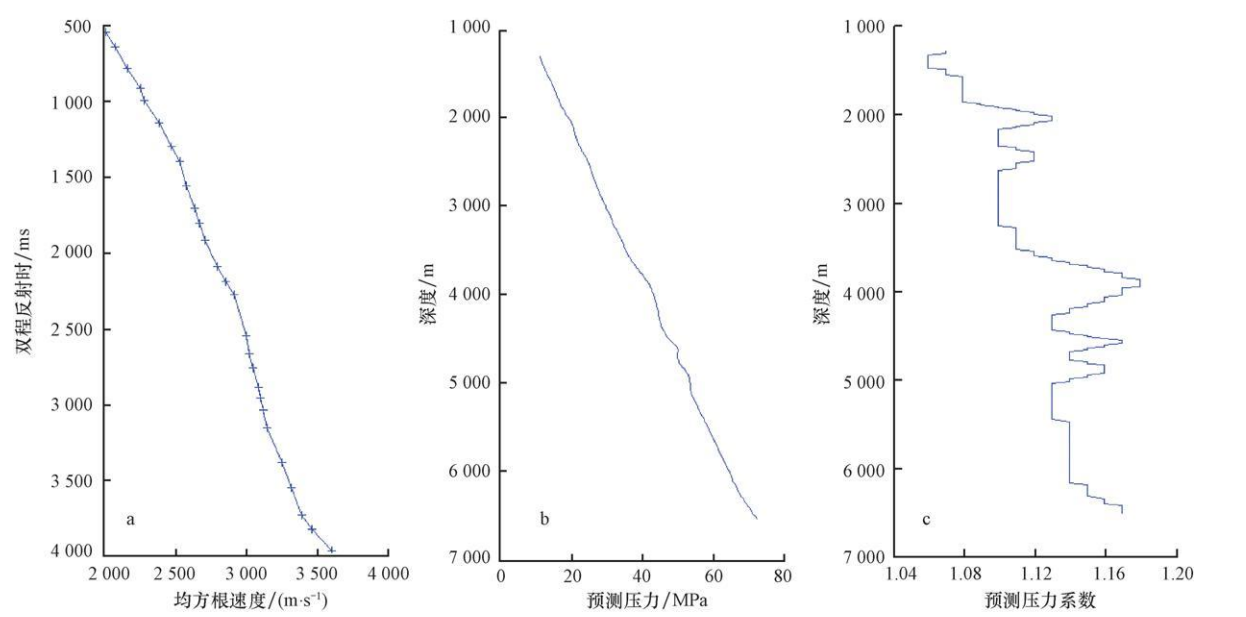


图 3 W33井速度谱预测的地层压力和压力系数

Fig. 3 Prediction of pore pressure and pressure coefficient using velocity spectrum in W33 well

(图 3c), 主要因为它去掉了低频趋势。该井压力系数的变化范围在 1.0~1.2 之间, 属于正常压力系统。工区缺少压力测试资料, 为了验证压力预测结果, 利用临井 W8 的实用泥浆密度进行比较(表 1)。一般情况钻井使用的泥浆密度正比于其压力系数, 表 1 中 W33 井压力预测值的趋势与临近井 W8 井的实用泥浆密度比较吻合, 说明该方法的正确与合理。

3.2 声波曲线预测地层压力

声波在地层中传播速度与岩石的密度、结构、孔隙度及埋藏深度密切相关。不同的地层, 不同的岩性, 存在不同的声波速度。声波测井所记录的纵向传播速度主要是岩性和孔隙度的函数, 对砂泥岩而言, 声波测井曲线基本上为一条反映孔隙度变化的曲线, 在正常压实情况下, 声波传播时

间将随埋藏深度的增加而减小, 而声波传播速度则随埋藏深度的增加而增大, 如遇异常地层压力过渡带, 泥岩孔隙度增加, 声波时差将偏离正常压实趋势线^[19], 应用声波测井资料可以对欠压实作用产生的异常压力进行预测。

根据声波资料可以利用等效深度法进行地层压力预测, 将声波曲线转换为地层层速度后可以利用速度谱法预测地层压力。我们选取塔河油田进行了 MDT 压力测试 13 口声波测井, 对两种方法进行的压力预测结果进行比较。塔河油田 W903 井 3 000~6 000 m 井深的声波时差随着深度增加而降低(图 4a), 红线为压实曲线, 在 3 000~6 000 m 深度范围内基本为一条直线, 利用最小二乘法拟合出该压实曲线, 根据压实曲线方程, 利用等效速度法预测得到的地层压力如图 4b 中黑线所示, 压力系数如图 4c 中黑线所示, 由于压实曲线的选取受人为因素影响较大, 预测的压力结果与 MDT 测试的压力值差异较大, 最大差异可以达到 20%, 等效速度法预测得到压力系数范围在 0.8~1.4 之间, 变化大, 结果不够稳定。速度谱法预测的地层压力系数如图 4c 中蓝线所示, 其范围在 1~1.15 之间, 结果稳定, 预测的地层压力与实测的 MDT 结果的误差在 4% 以内(表 2), 可见速度谱法预测地层压力具有较高的精度。

表 1 W33井速度谱预测的压力与 W8井泥浆密度的比较

Table 1 Comparison of predicted pore pressure and pressure coefficient with mud density in W8

井段 /m	压力系数	W8井实用泥浆密度/(g·cm ⁻³)
1 857.5~3 117.5	1.10~1.13	1.14
3 117.5~3 555.0	1.10~1.15	1.14~1.15
3 555.0~5 126.0	1.13~1.21	1.20~1.31
5 126.0~5 775.0	1.14~1.19	1.29~1.32
5 775.0~6 060.0	1.13~1.18	1.16~1.26

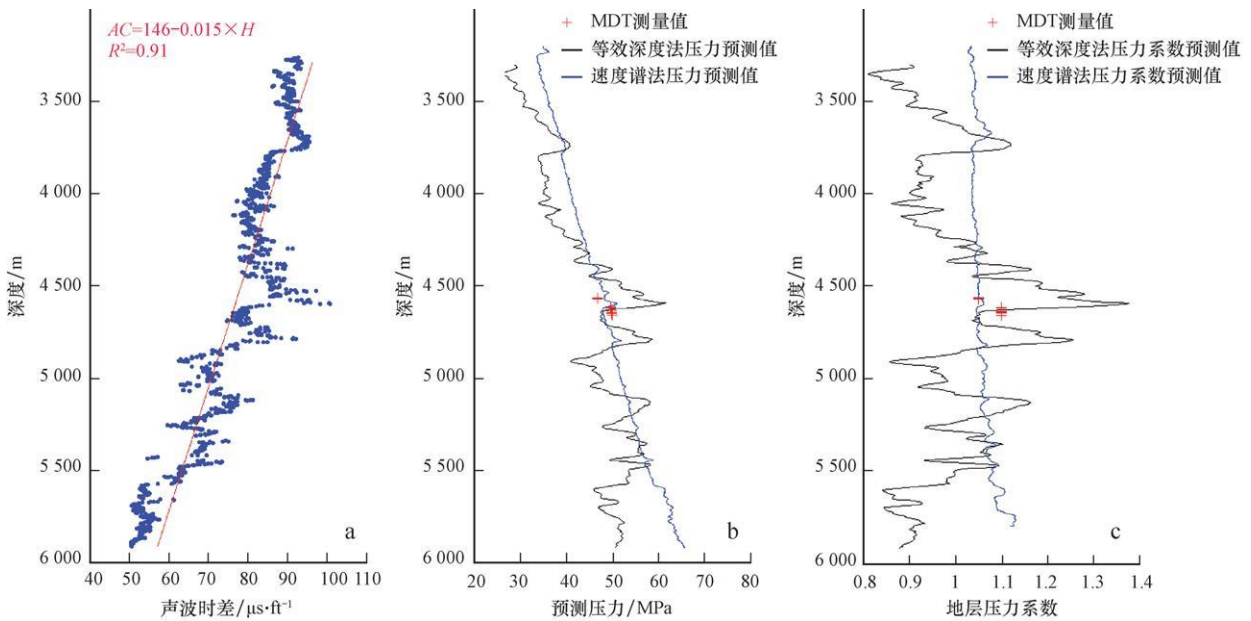


图 4 W 903井两种方法预测的地层压力及压力系数结果

Fig. 4 Prediction of pore pressure and pressure coefficient using two methods in W903 well

表 2 W 903井地层压力预测与 MDT 测试压力值对比

Table 2 Comparison of predicted pore pressure and pressure coefficient with measured values from MDT testing in W903 well

深度 /m	MDT法		等效深度法			速度谱法		
	压力 /MPa	压力系数	压力 /MPa	压力系数	预测压力 误差, %	压力 /MPa	压力系数	预测压力 误差, %
4 560.51	47.04	1.05	54.613	1.222	16.10	48.65	1.089	3.42
4 562.99	47.06	1.05	54.613	1.222	16.05	48.58	1.086	3.23
4 564.98	47.09	1.05	55.198	1.234	17.22	48.51	1.084	3.02
4 568.50	47.12	1.05	56.023	1.252	18.89	48.45	1.082	2.82
4 611.01	49.84	1.10	56.235	1.244	12.83	48.89	1.082	-1.91
4 611.49	49.85	1.10	56.235	1.244	12.81	48.89	1.082	-1.93
4 614.00	49.85	1.10	54.506	1.205	9.34	48.55	1.074	-2.61
4 616.00	49.86	1.10	52.166	1.152	4.62	48.41	1.070	-2.91
4 617.01	49.87	1.10	52.166	1.152	4.60	48.36	1.069	-3.03
4 634.02	50.03	1.10	48.196	1.061	-3.67	48.22	1.062	-3.62
4 639.49	50.09	1.10	47.815	1.052	-4.54	48.28	1.062	-3.61
4 644.50	50.14	1.10	47.758	1.050	-4.75	48.34	1.062	-3.59
4 654.50	50.25	1.10	47.946	1.051	-4.59	48.39	1.061	-3.70

利用塔河油田 13 口井声波测井资料, 等效深度法预测的地层压力 (图 5a) 与 MDT 值的对比, 等效深度法预测的地层压力值范围比较分散, 与实测压力值相关性低, 约为 0.78 (图 6a); 速度谱法预测的地层压力 (图 5b) 与 MDT 值比较接近, 二者基本在一条直线上, 相关值高, 约为 0.97 (图 6b)。通过对比, 认为利用声波速度进行地层压力预测的方法具有较好的精度和稳定性, 由此也证明了

速度谱预测地层压力的方法具有较好的精度和可信性, 该方法适用于塔河工区地层压力预测, 值得我们应用与推广。

4 结论

通过本次研究和实测 MDT 资料的验证, 表明塔河油田托浦台工区的地层压力系数范围在 1.0~1.2

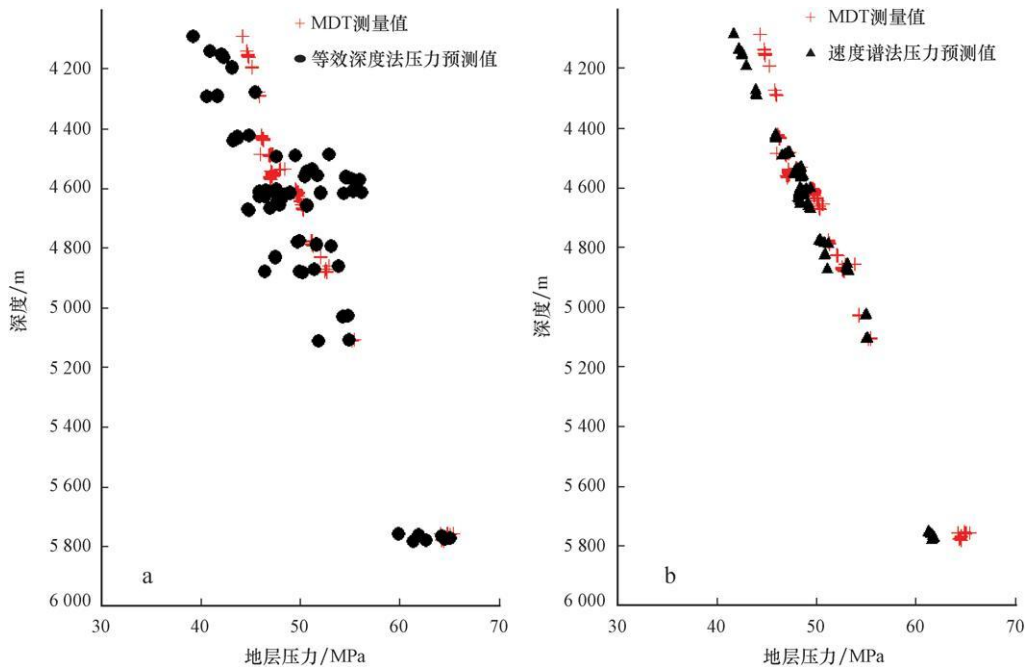


图 5 塔河油田 13 口井预测的地层压力与 MDT 测量值的对比

Fig. 5 Comparison of predicted pore pressure with measured values from MDT testing for 13 wells in Tahe oilfield

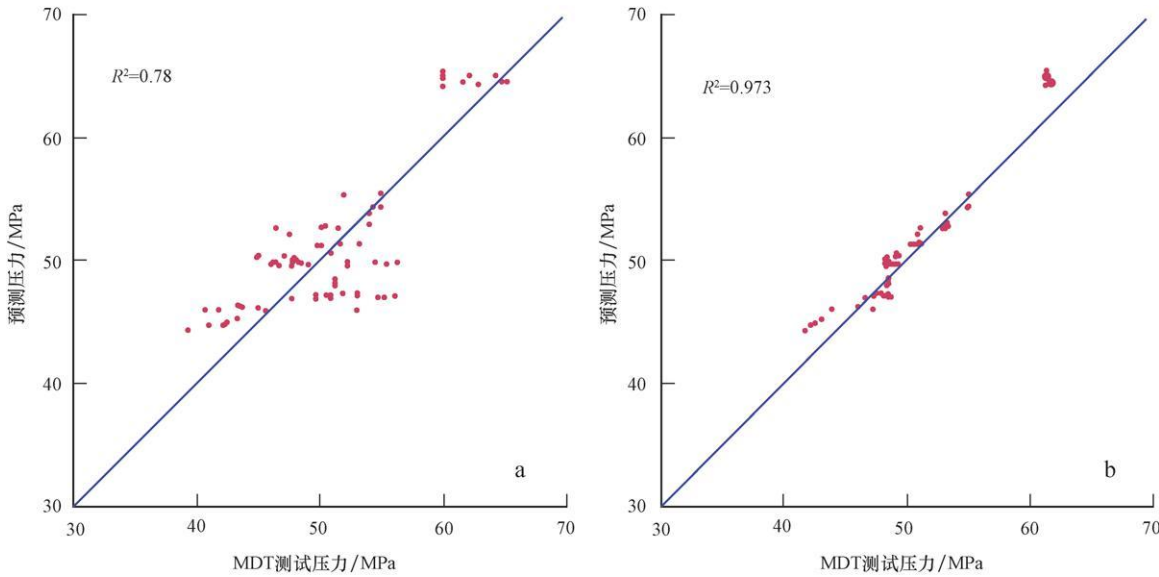


图 6 塔河油田 13 口井地层预测压力与 MDT 测量值交会图

Fig. 6 Cross plots of predicted pore pressure with measured values from MDT testing for 13 wells in Tahe oilfield

之间, 属于正常压力系统; 速度谱预测地层压力与 MDT 测试压力的最大误差为 5%, 而等效深度法预测误差最大达 15%左右, 速度谱法比等效深度法预测地层压力具有较高的精度和可靠性。利用地震速度资料进行地层压力预测在塔河油田是切实可行的, 该方法具有坚强的理论基础和较高的精度, 并且可以获得从浅层到深层连续的地层压

力曲线和压力剖面, 为研究区域地层压力分布提供支持, 值得我们应用与推广, 具有较大的应用价值。

参 考 文 献

[1] 常文会, 秦绪英. 地层压力预测技术 [J]. 勘探地球物理进展, 2005 28(5): 314- 319.

- Chang Wenhui Q in Xuying Technologies for prediction of pore pressure[J]. Progress in Exploration Geophysics 2005, 28 (5): 314–319
- [2] 曾治平,郝芳,宋国奇,等.车镇凹陷套尔河洼陷古地层压力演化与油气幕式成藏[J].石油与天然气地质,2010 31 (2): 193–197
- Zeng Zhiping Hao Fang Song Guoqi et al Palaeoformation pressure evolution and episodic hydrocarbon accumulation in Tao' erhe Depression Chechen Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2010 31 (2): 193–197.
- [3] 赵健.松辽盆地西斜坡泥岩地层压实规律[J].石油与天然气地质,2010 31 (4): 486–492
- Zhao Jian Laws of mudstone compaction on the west slope of the Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31 (4) : 486–492
- [4] 刘晖,操应长,姜在兴,等.渤海湾盆地东营凹陷沙河街组四段膏盐层及地层压力分布特征[J].石油与天然气地质,2009 30 (3): 287–293.
- Liu Hui Cao Yingchang Jiang Zaixing et al Distribution characteristic of evaporates and formation pressure of the forth member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag the Bohai Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010 31 (3): 287–293.
- [5] 宁松华,贾民强,龚丹.托浦台石炭系砂泥岩储层预测[J].新疆石油天然气,2006 2 (4): 4–6.
- Ning Songhua Jia Minqiang Gong Dan. Sand and shale reservoir prediction in Tuoputai area[J]. Xinjiang Oil & Gas 2006, 2 (4): 4–6.
- [6] 魏茂安,陈潮,王延江.地层孔隙压力预测新方法[J].石油与天然气地质,2007 28 (3): 395–400
- Wei Maoan, Chen Chao Wang Yanjiang New approach for pore pressure prediction[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28 (3): 395–400.
- [7] 曾治平,杨世刚,肖伶俐,等.东濮凹陷文留、桥口与白庙地区地层超压对有机质演化的影响[J].石油与天然气地质,2006 28 (4): 214–216.
- Zeng Zhiping Yang Shigang Xiao Lingli et al Effect of overpressure on organic matter evolution in Wenliu Qiaokou and Baicao regions of Dongpu Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2006 28 (4): 214–216.
- [8] 郭建平,冯兴强.塔河地区泥盆系东河塘组储层特征研究[J].资源与产业 2009 11 (2): 108–113.
- Guo Jianping Feng Xingqiang Characteristics of Devonian Donghetang Formation reservoir in Tahe area[J]. Resources & Industries 2009, 11 (2): 108–113.
- [9] 季玉新,刘春园,陈冬,等.分频反演方法及其在塔河 A 区储层预测中的应用[J].石油与天然气地质,2010 31 (1): 38–42
- Ji Yuxin Liu Chunyuan, Chen Dong et al Frequency-divided inversion and its application to reservoir prediction in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2010 31 (1): 38–42.
- [10] 翟振飞,傅恒,黄海平,等.塔里木盆地托浦台泥盆系东河砂岩沉积特征[J].重庆科技学院学报,2010 12 (1): 14–17
- Zhai Zhenfei Fu Heng Huang Haiping et al Sedimentary characteristics of Devonian Donghe sandstone in Tuoputai Tarim Basin[J]. Journal of Chongqing Technical College, 2010 12 (1): 14–17.
- [11] 李忠慧,楼一珊,王兆峰,等.地层压力预测技术在准噶尔盆地钻井中的应用[J].天然气工业,2009 29 (8): 66–68.
- Li Zhonghui Lou Yishan, Wang Zhao Feng et al Application of pore pressure prediction in drilling in Zhunger Basin[J]. Gas industry, 2009 29 (8): 66–68.
- [12] 漆立新,云露.塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素[J].石油与天然气地质,2010 31 (1): 1–12
- Qi Lixin Yun Lu. Development characteristics and main controlling factors of the Ordovician carbonate karst in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2010 31 (1): 1–12
- [13] 张卫华,何生,郭全仕.地震资料预测压力方法和展望[J].地球物理学进展,2005 20 (3): 814–817.
- Zhang Weihua He Sheng Guo Quanshi The methods and headway for pressure prediction[J]. Progress in Geophysics 2005 20 (3): 814–817.
- [14] Sayers C M. An introduction to velocity-based pore pressure estimation[J]. The Leading Edge 2006, 25 (12): 1496–1499.
- [15] Terzaghi K. Theoretical soil mechanics [M]. New York: John Wiley and Sons Inc 1943 528.
- [16] Gutierrez M A, Braunsdorf N R, Couzens B A. Calibration and ranking of pore pressure prediction models[J]. The Leading Edge, 2006 25 (12): 1516–1523
- [17] Fillippone W R. Estimation of formation parameters and the prediction of overpressure from seismic data [C] // Expanded abstracts of 52nd annual international SEG Meeting 1982 502–503
- [18] 金业权,王越之,李自俊.地震资料预测地层压力的研究[J].石油钻探技术,2001 29 (3): 28–29
- Jin Yequan Wang Yuezhi Li Zijun. Study on prediction of formation pressure with seismic Data[J]. Petroleum Drilling Techniques 2001, 29 (3): 28–29
- [19] 李新宁,李留中,徐向阳,等.异常地层压力的形成原因及预测方法[J].吐哈油气,2006 11 (2): 120–126
- Li Xinyu, Li Liuzhong Xu Xiangyang et al The reasons and prediction methods of abnormal pressure of layer[J]. Tuha Oil & Gas 2006 11 (2): 120–126.

(编辑 张亚雄)