

泥页岩地层孔隙压力预测新方法

陈 鸣,余立文,秦 瑞,高云龙,王 锋

(中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东 湛江 524000)

摘要: Eaton公式和Yan公式都是比较常用的孔隙压力预测方法,但它们在计算过程中都要求取正常压实速度,而正常压实速度一般是由浅层正常压实地层的纵波速度拟合得来,在浅层纵波时差曲线缺失或质量较差的情况下往往难以准确求取。基于此,提出了一种新的方法来预测孔隙压力,结合Eaton公式和Yan公式,在不求取正常压实速度的情况下预测孔隙压力,避免了上述问题。通过实际测井数据的标定,发现新方法预测的结果比用Eaton公式和Yan公式的预测效果好,并利用新方法研究了密度和纵波速度对孔隙压力的影响。此外,新方法还被成功地应用到利用地震资料预测孔隙压力剖面,且通过井资料的标定发现预测结果可信度较高。

关键词: 孔隙压力;有效压力;泥页岩地层;储层评价

中图分类号: TE132 **文献标志码:** A

A new method for prediction of pore pressure in shale formation

CHEN Ming, YU Liwen, QIN Rui, GAO Yunlong, WANG Feng

(Zhanjiang Company of CNOOC, Zhanjinang 524000, China)

Abstract: Eaton's equation and Yan's equation are both commonly used in pore pressure prediction, but they both require normal compaction velocity in the calculation process. The normal compaction velocity is generally fitted by the longitudinal wave velocity of shallow normal compaction formations, and it is often difficult to obtain accurately when the shallow longitudinal wave time difference curve is missing or the quality is poor. To solve the problem, a new method for pore pressure prediction has been proposed. This method combines Eaton's equation and Yan's equation to predict the pore pressure without calculating the normal compaction velocity, avoiding the above-mentioned problems. Through the calibration of actual logging data, it is found that the prediction results of the new method are better than those of Eaton formula and Yan formula, and the new method is used to study how the density and longitudinal wave velocity affect the pore pressure. In addition, the new method has been successfully applied to predict the pore pressure profiles using seismic data, and the calibration of well data has found that the prediction results are highly reliable.

Key words: pore pressure; effective pressure; shale formation; reservoir evaluation

孔隙压力预测在泥页岩地层中应用广泛。在勘探阶段,它可以用来分析烃类运移和储层密封能力;在开发阶段,它可以用来分析储层驱动力和连通性;在钻井阶段,它可以作为套管设计的重要参考依据^[1]。孔隙压力与诸多储层参数具有紧密的联系,如孔隙度、流体类型、储层连通性、地层压实程度等,因此孔隙压力信息能够为储层评价及钻井提供一定的指导性意见。孔隙压力通常是由盆地模型或地层速度求取,前者所求出的孔隙压力准确度相对较低。

通常选取Eaton公式和Yan公式,通过地层压实速度来预测地层孔隙压力。但是Eaton公式和Yan公式在预测孔隙压力的过程中都存在缺点,即需要

求取正常压实速度。而正常压实速度通常是由浅层的速度拟合求取,但在浅层声波时差曲线缺失或波动大时误差较大^[2-3]。本文提出了一种新方法预测孔隙压力,该方法联合Eaton公式和Yan公式,在不求取正常压实速度的情况下能准确预测出孔隙压力^[4-6],避免了由于求取正常压实速度所带来的误差。

本次研究在泥页岩地层段运用新方法来预测基于测井及地震资料的孔隙压力,该工区的岩性主要为泥页岩,伴有少量的砂岩薄层与泥质砂岩薄

收稿日期:2020-08-03;改回日期:2020-12-20。

第一作者简介:陈鸣(1982—),高级工程师,从事测井作业和技术管理工作。E-mail:chenming4@cnooc.com.cn

层。测井结果显示,新方法的预测效果明显好于用 Eaton 公式与 Yan 公式,且新方法能够成功地运用到地震资料预测上。在沿目的层提取的孔隙压力平面图上,产气井位于孔隙压力高压异常区域,说明孔隙压力与储层特性密切相关,孔隙压力信息为优质储层评价提供了一个可行的方案。

1 孔隙压力预测理论

1.1 速度-有效压力公式

1.1.1 Eaton 公式

Eaton 公式(1975)^[7]通过地震波速度来预测有效压力,其表达如下:

$$\frac{V_p}{V_{pn}} = \left(\frac{P_d}{P_{dn}} \right)^{\frac{1}{E}} \quad (1)$$

式中 V_p 为实测地震波速度, m/s; V_{pn} 为正常压实情况下的速度, m/s; P_d 为有效压力, MPa; P_{dn} 为正常压实下的有效压力, MPa; E 为 Eaton 系数。

1.1.2 Yan 公式^[8-9]

Yan 等人在 Eaton 公式的基础上,结合了实验室岩心测量的数据,在保证输入参数不变的情况下改进了 Eaton 公式,预测结果较 Eaton 公式更好,其表达式如下:

$$V_p = V_{pn} + C \left(e^{-1} - e^{-\frac{P_d}{P_{dn}}} \right) \quad (2)$$

式中 C 为回归系数。

1.1.3 新模型

结合上述两种公式,本文得到一个新的预测孔隙压力的公式。该公式由公式(1)和公式(2)消去 V_{pn} 所得:

$$V_p \left(1 - \left(\frac{1}{\delta} \right)^{\frac{1}{E}} \right) = C (e^{-1} - e^{-\delta}) \quad (3)$$

式中 $\delta = \frac{P_d}{P_{dn}}$ 。

相对于 Eaton 公式和 Yan 公式,利用新模型求取有效压力的优点是不需要求取正常压实速度 V_{pn} 。因此在浅层声波时差曲线缺失或者曲线波动大,难以确定 V_{pn} 的情况下利用新方法能够更为准确地求出地层的孔隙压力。

1.2 孔隙压力求取流程

利用测井资料预测孔隙压力流程图见图1。

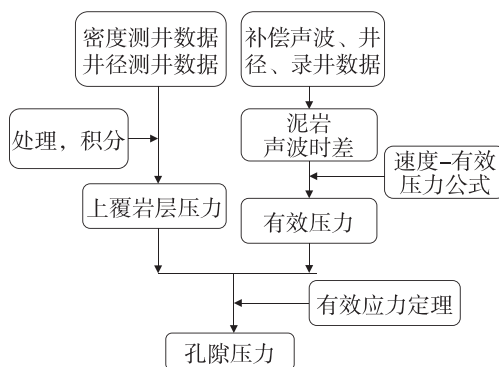


图1 利用测井资料预测地层孔隙压力的流程

孔隙压力求取需要用到密度测井和声波测井,具体计算步骤如下:

(1)用密度曲线求出上覆地层压力 P_c :

$$P_c = \int \rho_z g dH \quad (4)$$

式中, P_c 为上覆地层压力, MPa; ρ_z 为密度测井值, g/cm³; g 为重力加速度, m/s²; d 为回归系数; H 为深度, m。

(2)求出静水压力 P_{pn} 及正常压实情况下的有效压力 P_{dn} :

$$P_{pn} = \rho_w g H \quad (5)$$

$$P_{dn} = P_c - P_{pn} \quad (6)$$

式中, P_{pn} 为静水压力, MPa; ρ_w 为水的密度, g/cm³。

(3)由实测速度曲线判断出正常压实层段并拟合出正常压实速度曲线 V_{pn} :

$$V_{pn} = V_0 + cH \quad (7)$$

式中, c 为拟合直线斜率; V_0 为拟合直线截距, m/s。

(4)结合公式(4)~(7)以及声波测井曲线,带入到速度-有效压力公式求出有效压力 P_d ;

(5)用有效压力定理求出孔隙压力 P_p :

$$P_p = P_c - P_d \quad (8)$$

2 测井资料预测结果

基于测井资料,运用 Eaton 公式、Yan 公式和新提出的公式,分别对一口泥页岩井进行了孔隙压力预测,所预测出来的孔隙压力如图2所示。该井在目的层泥页岩地层中产有页岩气。图2中第二列的正常压实趋势线 V_{pn} 由浅层泥页岩的纵波速度拟合,该参数是 Eaton 公式、Yan 公式都必需的参数。但是由于浅层纵波速度曲线波动较大的原因,所求取出来的 V_{pn} 并不准确,因此 Eaton 方法和 Yan 方法所预测出来的孔隙压力缺乏一定的可信度。图2中最后

一系列的红点数据为地层压力测试得到的实测孔隙压力点,用来作对比研究找出最适用于泥页岩地层的孔隙压力预测方法。从图2可以看出,通过新方法预测出来的孔隙压力与实测的孔隙压力数据结果最为相近,因此相对于Eaton公式和Yan公式,新方法在该井的预测效果最好。这主要是由于新方法不需要取 V_{p0} 的缘故,从而避免了在求取 V_{p0} 的过程中所带来的误差。从图2中的第4列和第5列可以看出,该井在580~640 m深度段是富含有机质和CH₄的含气层段,主要产页岩气。且在该层段预测出来的孔隙压力要明显大于静水压力,主要的高压生成机制是由于生烃作用引起的。因此孔隙压力的高压异常可以作为评估储层含气性的一个重要参数。

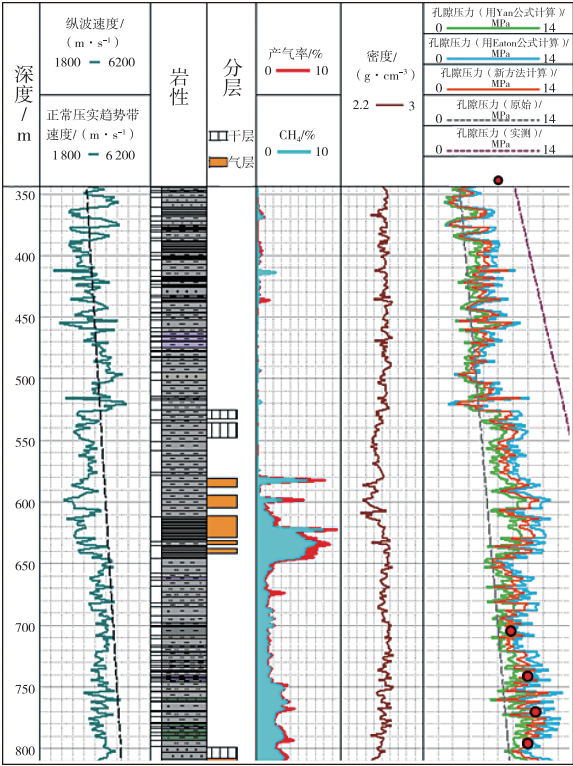


图2 泥页岩井孔隙压力预测结果分析

3 影响因素分析

地层压力计算过程中需要用到密度、纵波速度,为了研究密度和纵波速度是如何影响地层压力的,选取了该井620~670 m近似深度层段的数据进行了影响因素研究,分别了解密度和纵波速度对有效压力和孔隙压力的影响。首先通过式(3)得出了有效压力随密度和纵波速度的变化规律,结果如图3所示。图3中黑色的线代表正常压实下的有效压力,可以看出当密度和纵波速度变化时,正常压实

下的有效压力也会产生变化。这主要是由于岩层的密度和纵波速度增大时,会导致上覆地层压力增大,因此正常压实下的有效压力也增大。图3中的黑点代表井中产气层段的数据,左边圆圈的数据对应井中620~650 m深度段,该层段产页岩气;右边圆圈的数据对应井中650~670 m深度段的数据,该层为正常压实层段,不产页岩气。从图3中可以看出,相比于正常压实层段的数据,产页岩气层段的数据具有更小的纵波速度、更小的有效压力和相对较小的密度,这主要是由于地层含气的原因。

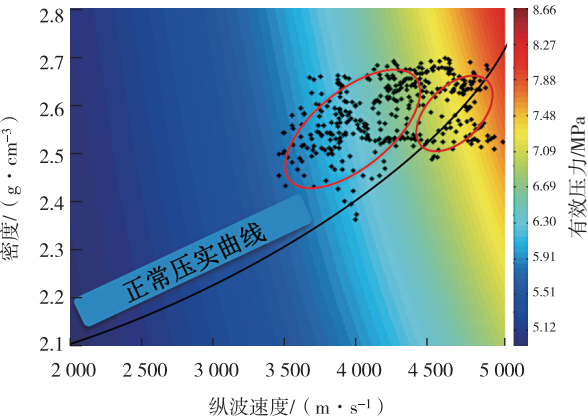


图3 密度和纵波速度对有效压力的影响

结合有效应力定理,通过式(3)可以得出孔隙压力随密度和纵波速度的变化规律,结果如图4所示。图4中黑色的线代表正常压实下的孔隙压力,即静水压力,从图中可以看出当密度和纵波速度按一定比例增大时,孔隙压力保持静水压力不变,而密度和纵波速度的变化规律不满足这个条件时,地层就会处于孔隙压力高压或者低压的状态。当密度增大明显多于纵波速度时,地层处于超压状态;相反,地层就会处于低压状态。图4中左侧圆圈内的数据显示了更小的纵波速度、更大的孔隙压力和相对较小的密度,这主要是由于地层含气的原因。

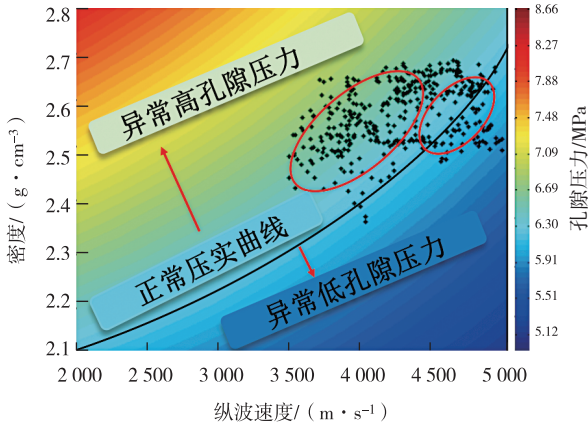


图4 密度和纵波速度对孔隙压力的影响

在图3和图4中,左侧圆圈内的数据对应为井中650~750 m深度段的数据,即图2中的产气层段。从上述影响因素分析可以得知,该层段的数据显示了较小的纵波速度、较小的有效压力、较大的孔隙压力和相对较小的密度,这与图2中所显示的规律是一样的。因此这些储层参数对于研究储层的含气性具有至关重要的作用。

4 地震资料预测孔隙压力

通过上述研究已经知道新方法能够比较精准地利用测井资料预测出孔隙压力,因此该方法在本工区较为适用,利用该方法求取地震上的孔隙压力也是合理的。为了增加预测结果的精准度,公式(3)中所用到的回归参数 C 和 E 通过实测孔隙压力资料标定的方法来得到。同时,测井上预测的孔隙压力被用来检验地震资料预测结果的精准度^[10]。

基于地震层速度剖面,利用新方法求取了地震资料上的孔隙压力剖面,如图5所示。从图5可以看出,孔隙压力剖面分辨率较低的原因是因为所用的层速度剖面分辨率较低。井上预测出的孔隙压力与地震剖面吻合度较好。因此,利用新方法预测该工区地震资料上的孔隙压力是可行的。

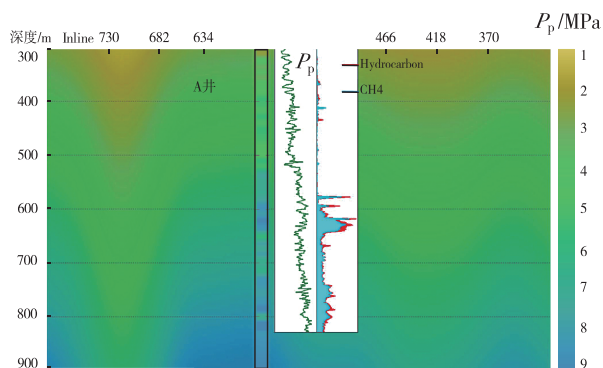


图5 基于地震资料预测的过井孔隙压力属性剖面
(颜色指示孔隙压力)

图6是沿目的层提取出来的沿层孔隙压力平面图。该目的层产页岩气。为了优选出目的层段的优质产气段,孔隙压力沿层平面图在此可起到对比分析的作用,并在孔隙压力平面上区分出优质产气段和普通层段。从图6中可以看出,产气井刚好为孔隙压力异常高压的区域,明显不同于周围区域孔隙压力的特征。所以,更希望选取孔隙压力异常高压的区域作为研究区域,因为根据上述研究,该区域含气的可能性更高。

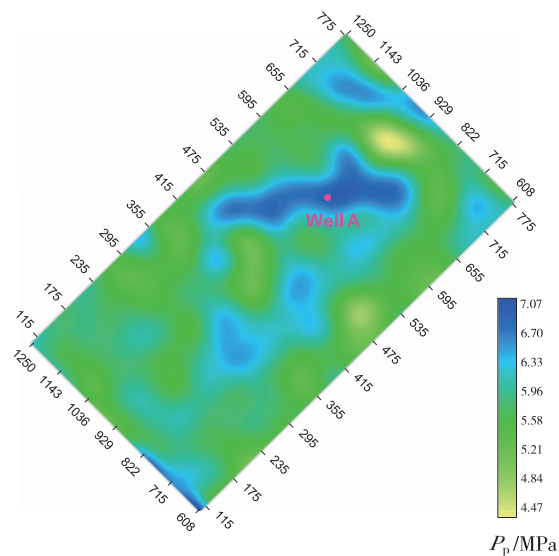


图6 沿目的层提取的孔隙压力属性平面图
(颜色指示孔隙压力)

5 结论

本文针对泥页岩地层提出了一种新的孔隙压力预测方法,相比于常用的Eaton公式和Yan公式,在预测孔隙压力的过程中不要求取正常压实速度,从而避免了求取正常压实速度过程中产生的误差。研究表明:该方法用在测井上的预测效果要明显优于Eaton公式和Yan公式,且在利用地震资料上预测结果同样也是可靠的,与测井结果的匹配度较高,另外,预测的孔隙压力剖面对于泥页岩地层的优质储层评价具有一定的指导性作用。

参考文献:

- [1] 贾新峰,杨贤友,周福建,等.孔隙压力预测方法在油气田开发中的应用[J].天然气技术,2009,3(2):31-33,78.
- [2] 臧艳彬,王瑞和,王子振,等.利用Eaton法计算地层孔隙压力的不确定性分析[J].西南石油大学学报(自然科学版),2012,34(4):55-61.
- [3] 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.
- [4] 云美厚.地震地层压力预测[J].石油地球物理勘探,1996,31(4):575-586,604.
- [5] 樊洪海,张传进.复杂地层地层孔隙压力求取新技术[J].石油钻探技术,2005,33(5):40-43.
- [6] 连太伟,樊洪海,于玲玲.测井约束地震反演在地层孔隙压力预测中的应用[J].西部探矿工程,2009,21(6):64-65.
- [7] EATON B A.The equation for geopressure prediction from well logs [C]//Fall Meeting of the (下转第69页)

超过1/3,平均射孔程度0.25,已开发40 a,地质储量采出程度已达到27.9%,综合含水73.4%,开发效果好,预计最终水驱采收率可达到36.2%。

5 结论

(1) 修正了底水油藏直井临界产量计算公式中的 $\cos(\varphi_0)$ 。

(2) 修正了底水油藏直井临界产量计算公式。

(3) 修正了底水油藏直井最佳射孔程度计算公式,且最佳射孔程度可求得解析解。

(4) 首次运用数学解析方法,求解了底水油藏直井最佳射孔程度的最大值为1/3,克服了以往运用大量数据进行数值运算的繁琐。

参考文献:

- [1] MUSKAT M, MYCKOFF R D. An approximate theory of water coning in oil production [J]. Transactions of the AIME, 1935, 114(1): 144-163.
- [2] MEYER H I, GARDER A O. Mechanics of two immiscible fluids in porous media [J]. Journal of Applied Physics, 1954, 25(11): 1400-1406.
- [3] SCHOLS R S. An empirical formula for the critical oil production rate [J]. Erdos Erdgas Z, 1972, 88(1): 6-11.
- [4] WHEATLEY M J. An approximate theory of oil-water coning [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas: Society of Petroleum Engineers, 1985.
- [5] HAGOORT J. Fundamentals of gas reservoir engineering [M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1988: 423-425.
- [6] ABASS H H, BASS D M. The critical production rate in water-coning system [C]//Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, Midland: Society of Petroleum Engineers, 1988.
- [7] GUO B Y, LEE R L H. A simple approach to optimization of completion interval in oil/water coning systems [J]. SPE Reservoir Engineering, 1993, 8(4): 249-255.
- [8] 蒋平, 张贵才, 葛际江, 等. 采用供给边界压力预测底水突破前水锥参数 [J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(6): 76-78.
- [9] 吕爱民, 姚军. 裂缝性底水油藏含水率及产量变化规律研究 [J]. 特种油气藏, 2006, 13(5): 56-58, 61.
- [10] 蒋平, 张贵才, 葛际江, 等. 底水油藏射孔优化设计 [J]. 石油钻探技术, 2007, 35(4): 70-72.
- [11] 涂彬, 韩洁, 孙健. 厚层底水油藏油井临界产量计算方法 [J]. 石油钻探技术, 2014, 42(4): 107-110.
- [12] 李春兰, 杨炳秀, 程林松. 气顶底水油藏直井开采最佳射孔位置和最佳射开厚度确定方法 [J]. 中国海上油气, 2004, 16(2): 105-106.
- [13] 朱圣举, 张明禄, 史成恩. 底水油藏的油井产量与射孔程度及压差的关系 [J]. 新疆石油地质, 2000, 21(6): 495-497.
- [14] 何巍, 黄全华, 管琳. 气顶底水油藏油井最佳射孔程度确定新方法 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2011, 33(4): 111-115, 195.
- [15] 陈余, 付玉, 岳三琪, 等. 裂缝性碳酸盐岩底水油藏临界产量计算研究 [J]. 油气藏评价与开发, 2016, 6(2): 19-23.

(编辑 谢 葵)

(上接第30页)

Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas, Texas: AIME, 1975; SPE-5544-MS.

- [8] YAN F Y, HAN D H, REN K Y. A new model for pore pressure prediction [C]//2012 SEG Annual Meeting, Las Vegas, Nevada: SEG, 2012: 1-5.
- [9] YAN F Y, HAN D H. Modeling of effective pressure effect on porous reservoir rocks [C]//SEG Technical Program

Expanded Abstracts 2009, Houston, Texas: SEG, 2009: 2025-2029.

- [10] KUMAR R, AL-SAEED M A, AL-KANDIRI J M, et al. Seismic based pore pressure prediction in a west Kuwait field [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2010, Denver, Colorado: SEG, 2010: 2289-2293.

(编辑 杨芝文)