

碳酸盐岩孔隙度预测新方法 在珠江口盆地的应用

张志伟,何 敏,陈胜红,陈兆明,徐 超,袁 才

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司,深圳 518054)

摘 要:孔隙度是油气勘探中储层预测、储层描述、储量估算和油气藏综合研究的一个重要评价参数,它的准确求取是一项非常重要的关键性技术。碳酸盐岩非均质性强,横向变化大,其孔隙度预测一直是个难题。常规方法对孔隙度进行计算存在精度不高、物理意义不明确等问题,常常不能满足油气勘探开发需求。因此,通过对 Gassmann 方程合理简化并引入 Eshelby—Walsh 干燥岩石椭球包体近似公式,推导出包含岩石孔隙结构参数、饱和岩石压缩系数与岩石基质压缩系数 3 个参数的计算孔隙度新公式,然后通过测井交汇图技术和叠前弹性参数反演技术,将其转化为与碳酸盐岩孔隙结构和纵横波速度、密度有关的具体计算公式。同时考虑到不同相带对碳酸盐岩储层孔隙结构的影响,故分相带对新方法进行了应用。结果表明,基于碳酸盐岩孔隙结构的孔隙度预测方法的精度高于常规方法。

关键词:碳酸盐岩孔隙度;Gassmann 方程;Eshelby—Walsh 方程;孔隙结构参数;叠前弹性参数反演

中图分类号:TE311+.2

文献标识码:ADOI:10.16028/j.1009-2722.2017.10006

孔隙度是油气勘探中储层预测、储层描述、储量估算和油气藏综合研究的重要参数之一,它的准确求取是一项非常重要的关键性技术。当遇到岩性比较单一,横向变化不大的研究区,通常有人采用 Raymer 方程或者 Wyllie 时间平均方程通过线性方法进行预测,但是这种方法对于孔隙类型多样、横向变化快、非均一性强的碳酸盐岩储层来说就不适用了^[1]。诚然,还有一种常用的非线性方法,就是基于地震单属性或者多属性,从测井或者有限的岩样统计出发,建立地震属性与孔隙度

之间的关系,通过神经网络法、多元线性回归法、随机模拟法等多种非线性方法反演出孔隙度,但是这种方法很少考虑到影响孔隙度的内在因素,使得其物理意义不明确,并且计算精度也不稳定。碳酸盐岩易溶性和非均质性较强,其孔隙空间变化复杂,样式多样,横向上变化迅速,与常规的碎屑岩相比,孔隙结构差异很大,导致其地球物理特征也有着很大的区别。因此,岩石弹性性质很大程度上受到岩石结构的影响,尤其是在进行碳酸盐岩储层孔隙度预测时,充分研究碳酸盐岩岩石内部结构和组分就显得非常重要。本文通过对 Gassmann 方程的合理简化并引入 Eshelby—Walsh 干燥岩石椭球包体近似公式,然后通过测井交汇图技术和叠前弹性参数反演技术将其转化为与碳酸盐岩孔隙结构和纵横波速度、密度有关的具体计算公式,同时还考虑了不同相带对碳酸

收稿日期:2017-05-30

基金项目:“十三五”国家科技重大专项课题“南海东部海域勘探新领域及关键技术”(2016ZX05024-004)

作者简介:张志伟(1982—),男,硕士,工程师,主要从事地球物理解释、地震反演与储层预测方面的研究工作。E-mail:zhang-zhw5@cnooc.com

盐岩孔隙结构的影响。在此基础上,应用上述方法对南海北部珠江口盆地惠州工区珠江组碳酸盐岩地层进行了孔隙度预测,取得的研究结果与实际钻井成果吻合较好,实践证明,基于碳酸盐岩孔隙结构的孔隙度预测方法的精度高于常规方法^[1-3]。

1 基于孔隙结构的孔隙度计算方法

目前通常用 Gassman 方程来描述双相介质,另外结合 Eshelby 椭球包体裂缝理论,在合理的假设前提下建立了基于压缩系数的一个比较实用的新方程:

$$\frac{1}{\bar{\beta}-\beta_s} = \frac{1}{\beta_D-\beta_s} + \frac{1}{(\beta_p-\beta_s)\eta} \quad (1)$$

式中 $\bar{\beta}$ 、 β_s 、 β_D 、 β_p 、 η 分别为储层的孔隙度、孔隙流体的压缩系数、含流体双相介质的基质(骨架)压缩系数、饱和孔隙流体岩石的有效压缩系数、干燥(含空气)岩石的压缩系数^[3]。

在含流体双相介质岩石中,考虑到油气水的压缩系数一般大于岩石基质(骨架)的压缩系数,对于一般原油的 β ,则为 $1\ 000 \sim 2\ 500) \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ 之间,即 $\beta_p \geq 500 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ ^[3],对气体而言, β 趋于无穷大,而岩石骨架的压缩系数 β_s 一般在 $15 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ 左右,因此可得近似关系式 $\beta_p - \beta_s \approx \beta_p$,这种近似有较高的精度,误差一般低于 1%,将其带入式(1)可以简化为^[3]

$$\frac{1}{\bar{\beta}-\beta_s} = \frac{1}{\beta_D-\beta_s} + \frac{1}{\beta_p\eta} \quad (2)$$

式(2)不仅适合一般的岩石类型,而且更适合于碳酸盐岩,因为根据 Mavko 等^[4]的研究,碳酸盐岩的 β_s 较碎屑岩的值低得多,更满足式(2)的近似条件。

引入由 Walsh^[5] 和 Eshelby^[6] 提出的带有孔隙结构的干燥多孔岩石和包体组成的二相体岩石的椭球包体等效弹性参数^[7-12]:

$$\beta_D = \beta_s (1 + m \frac{\eta}{\alpha}) \quad (3)$$

式中 m 、 α 都为干燥岩石椭球包体的结构参数, α 表示椭球孔隙或裂隙的纵横(或者长短轴)之比。

将(3)式带入(2)式,化简可得:

$$\eta = (\bar{\beta} - \beta_s) \left(\frac{1}{\beta_p} + \frac{C}{\beta_s} \right) = \bar{\beta} \left(\frac{1}{\beta_p} + \frac{C}{\beta_s} \right) - \beta_s \left(\frac{1}{\beta_p} + \frac{C}{\beta_s} \right) \quad (4)$$

式中: $C = \frac{\alpha}{m}$, C 为岩石孔隙结构参数。

令 $A = \left(\frac{1}{\beta_p} + \frac{C}{\beta_s} \right)$, $B = \left(\frac{1}{\beta_p} + \frac{C}{\beta_s} \right)$, 则式(4)可简化为:

$$\eta = A\bar{\beta} - B \quad (5)$$

在地质情况、流体性质等变化不大的情况下,式(5)中 A 和 B 为常数,因此,岩石孔隙度与饱和流体岩石的有效压缩系数就呈线性关系^[1]。

又有饱和岩石的体积模量:

$$K_{\text{sat}} = 1/\bar{\beta} = \rho(v_p^2 - \frac{4}{3}v_s^2) \quad (6)$$

将(6)式带入(5)式,最终获得孔隙度和纵、横波速度以及体积密度之间的非线性关系:

$$\eta = A \frac{1}{(v_p^2 - \frac{4}{3}v_s^2)} - B \quad (7)$$

因此,针对研究区的孔隙度预测可以按照以下思路和方法执行:首先,根据不同相带的测井数据获得纵横波速度、密度与孔隙度之间的关系,从而获得与不同沉积相带地层孔隙结构相关的参数 A 和 B ^[1];其次,利用研究区最终处理好的叠前地震道集数据,采用叠前弹性参数同时反演技术得到重要的纵横波速度和密度三参数体;再次,将前面获得的 A 、 B 参数,以及纵横波速度和密度参数带入到(7)式中最终获得研究区所需要的孔隙度体^[1-3]。

2 实际应用

珠江口盆地碳酸盐岩具有多期发育的特征,不同的期次具有不同的沉积相带和发育模式,不同沉积相带的孔渗条件不一样。通过对研究区地震相、测井相和岩心相的综合分析认为,研究区共发育 3 期灰岩:第 1 期灰岩为缓坡台地相;第 2 期灰岩为主要为台地边缘相,第 1 期和第 2 期灰岩在目标区都有发育;第 3 期仅在 W3-1 井处发育塔礁相。钻前用 W3-3 井常规的纵波阻抗与孔隙度线性拟合开展了孔隙度预测,根据预测认为 W2-2 井第 1 期可能发育一套高孔隙灰岩,孔隙度

>10%(图 1、2),是比较有利的碳酸盐岩储层,结果钻探下来并无任何荧光显示,录井显示是一套致密的泥质灰岩,孔隙度在 3% 左右(图 3),与钻前预测大相径庭,说明碳酸盐岩非均质性强,横向变化大,简单地用纵波阻抗与孔隙度线性拟合来预测孔隙度明显误差大,影响储层预测精度^[13-21]。

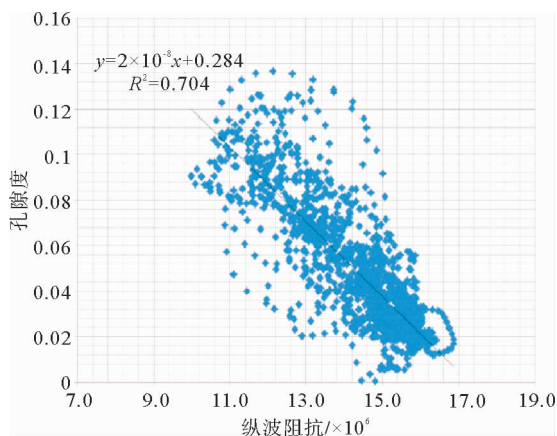


图 1 W3-1 孔隙度与纵波阻抗交汇

Fig. 1 W3-1 crossplot of porosity and P-wave impedance

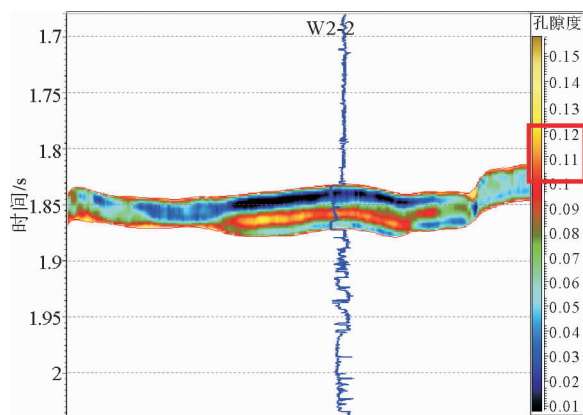


图 2 W2-2 孔隙度预测剖面

Fig. 2 Prediction profile of W2-2 porosity

因此,本文尝试采用上述新方法对其进行孔隙度预测。首先,叠前弹性参数反演的精确度是新方法预测孔隙度高精度的保障,而叠前地震数据的好坏决定了叠前弹性参数反演的精度。本工区属于海上采集三维地震资料,灰岩储层在 2 km 左右,属于中浅层,叠前地震资料信噪比、分辨率都较高,叠前弹性参数反演获得纵、横波速度数据和密度数据剖面的精度较高,从图 4、5 中可以看

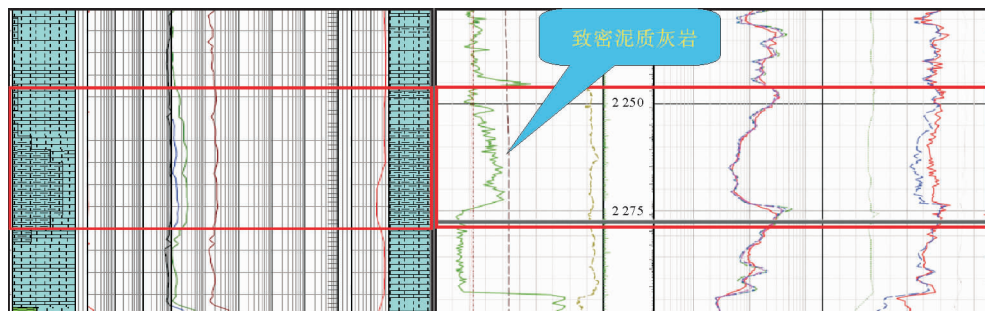


图 3 W2-2 实钻录井、测井解释

Fig. 3 Mudlog and log interpretation of W2-2

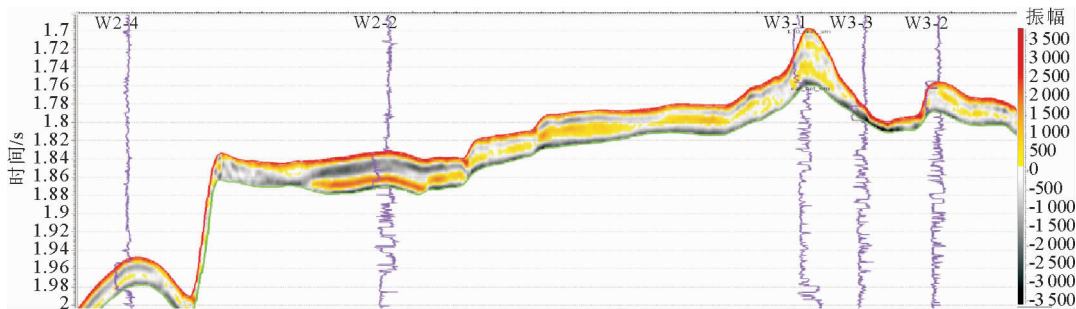


图 4 连井原始地震剖面

Fig. 4 Original seismic profile of welltie

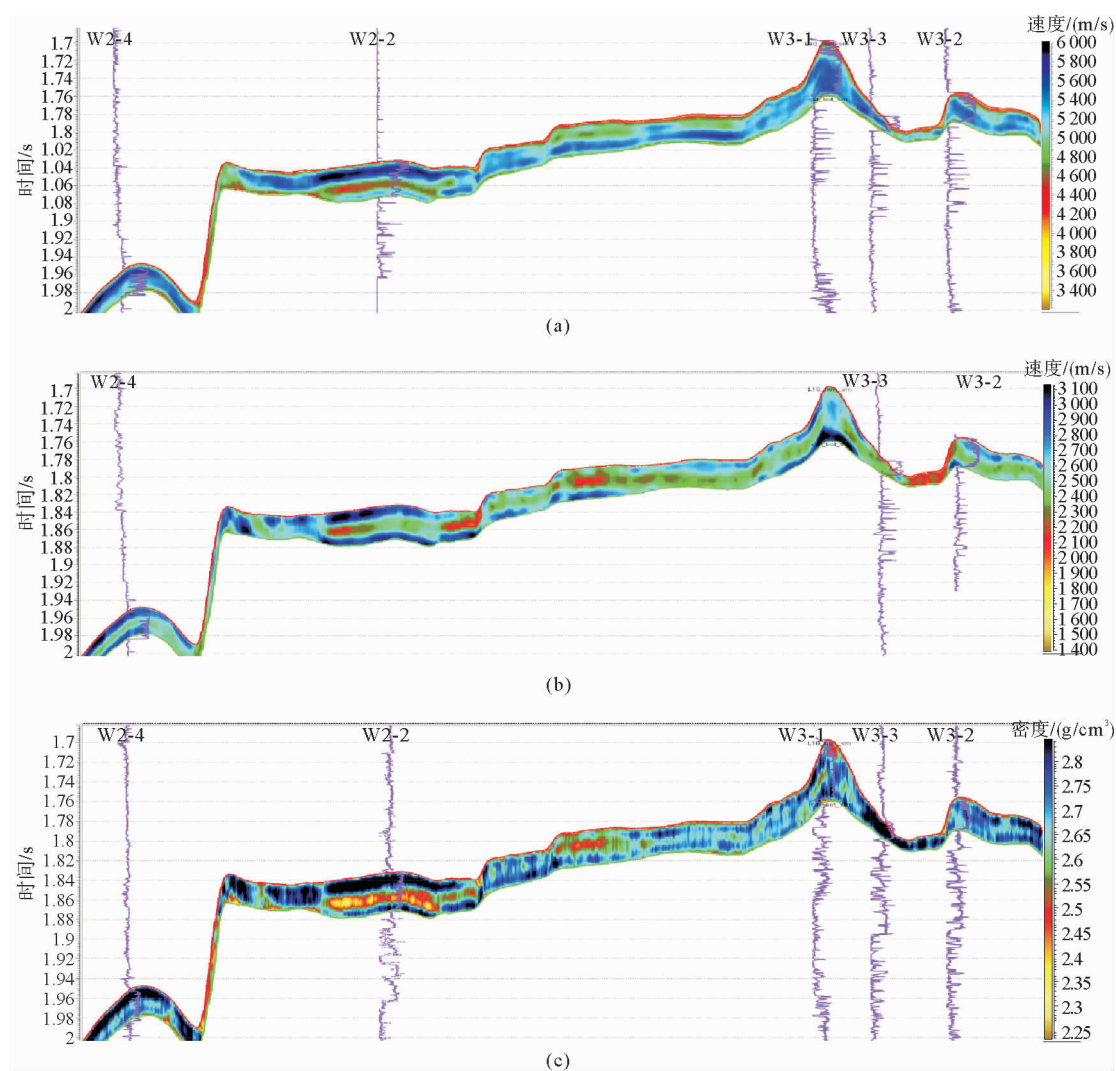


图 5 连井叠前反演纵波速度(a)、横波速度(b)和密度(c)剖面

Fig. 5 P-wave velocity (a), S-wave velocity (b) and density (c) profile of the well-connected pre-stack inversion

出,井旁道反演的数据与测井曲线的相关性较好,为进行孔隙度计算奠定了基础。

采用新方法对 W2-2 井进行孔隙度预测。交汇图的线性回归分析表明,孔隙度与饱和流体岩石的有效压缩系数之间有着良好的线性关系,与仅仅利用纵波速度计算孔隙度结果相比较,利用饱和岩石的有效压缩系数计算的孔隙度精确度提高了约 13%(图 6、7),并且预测孔隙度与实测曲线吻合较好(图 8),精度明显优于常规方法。

从应用效果看,W3-1 井基于新方法预测的储层孔隙度与实测的孔隙度吻合很好,预测精度较高(图 9、10);但是,W2-2 井的预测孔隙度依然在 10%左右,跟常规方法预测的差别不大

(图 11)。

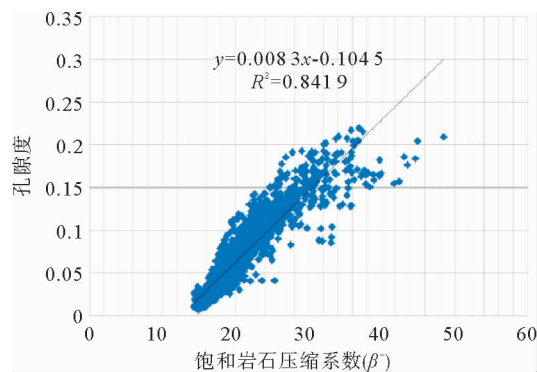


图 6 W3-3 孔隙度与饱和岩石有效压缩系数交汇

Fig. 6 W3-3 crossplot of the effective compression coefficients of the saturated rocks and porosity

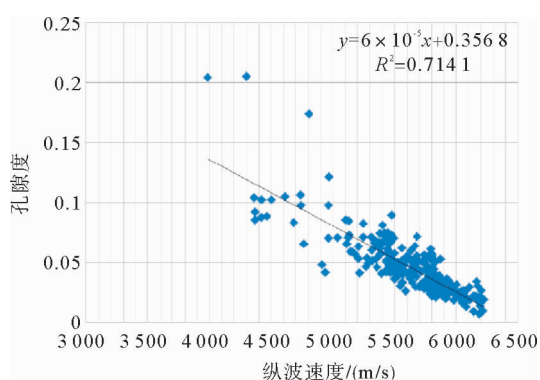


图 7 W3-3 孔隙度与饱和岩石纵波速度交汇

Fig. 7 W3-3 crossplot of the P-wave velocity of the saturated rocks and porosity

分析其原因:从位置上来看,W2-2 离 W2-4 井更近,两者更靠近台地边缘,而 W3-3 更靠近内缓坡台地;从地震相来看,W2-2 与 W2-4 更相近(图 12);从录井上看,W2-2 与 W2-4 井第 1 期灰岩岩性更相近;因此,用 W2-4 井预测 W2-2 井的孔隙度应该更合理,更精确可靠(图 13)。

因此,从应用效果看,采用与 W2-2 井沉积相和地震相类似的 W2-4 井基于新方法预测的孔隙度与实测的孔隙度吻合很好(图 14、15),预测精度较高;并且,预测 W2-4 井孔隙度在 5%左右,与实测的孔隙度吻合更好(图 16),比常规方法预测精度提高了 6%左右,精度更高。

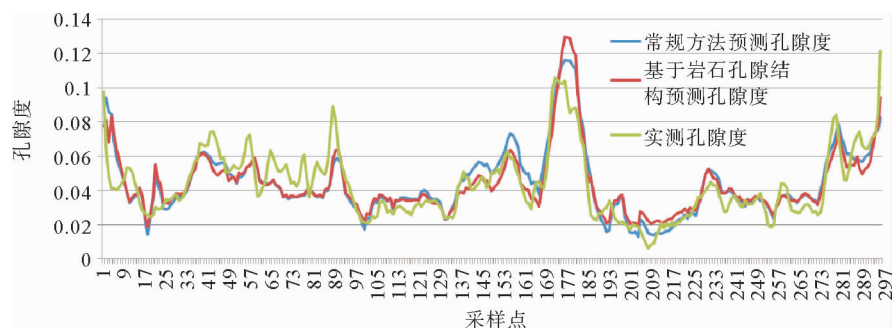


图 8 W3-3 井 2 种预测方法与实测孔隙度对比

Fig. 8 Comparison of the two prediction methods with the measured porosity of W3-3

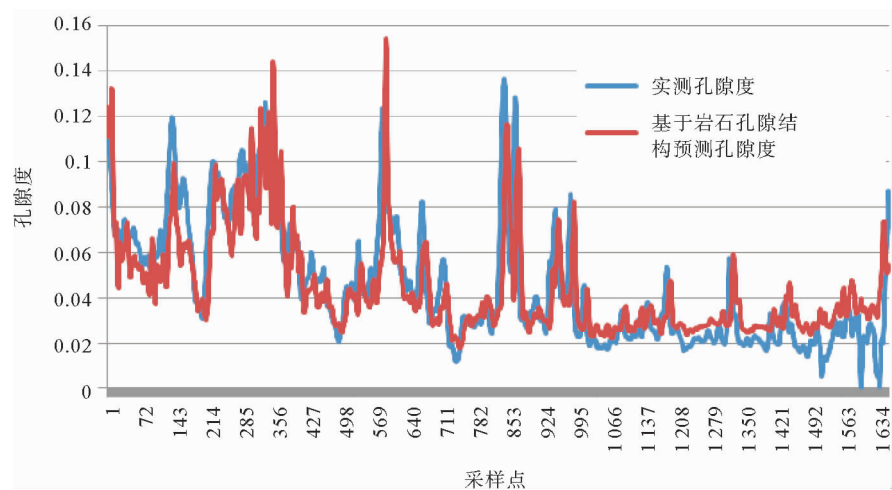


图 9 W3-1 井新方法预测孔隙度与实测孔隙度对比

Fig. 9 The contrast between the porosity from new method and the measured porosity of W3-1

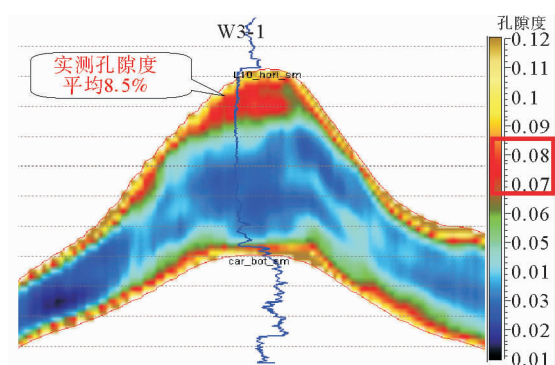


图 10 过 W3-1 井新方法预测孔隙度剖面
Fig. 10 The porosity profile through W3-1
of the new method

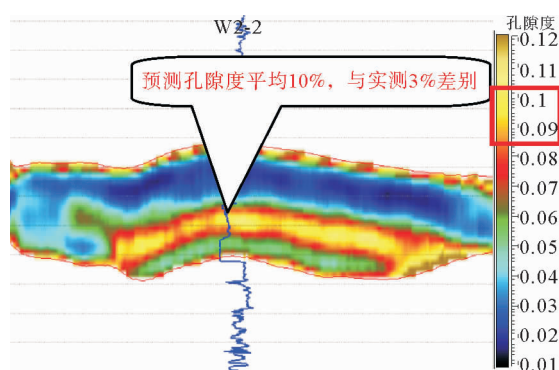


图 11 过 W2-2 井新方法预测孔隙度剖面
Fig. 11 The porosity profile through
W2-2 of the new method

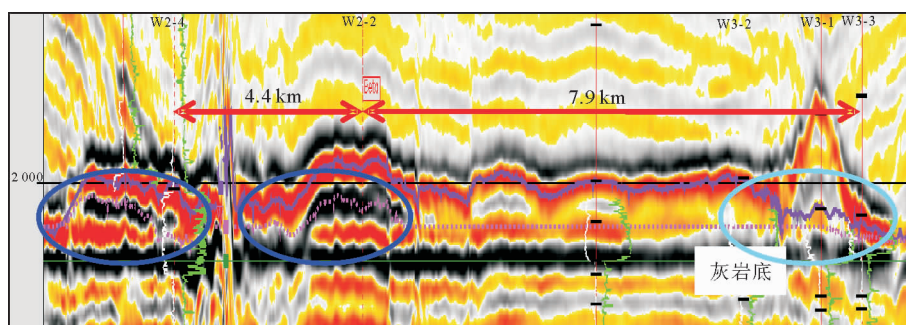


图 12 过 W2-2 井碳酸盐岩连井剖面地震相
Fig. 12 The carbonate rocks seismic facies profile through W2-2 of well-connected

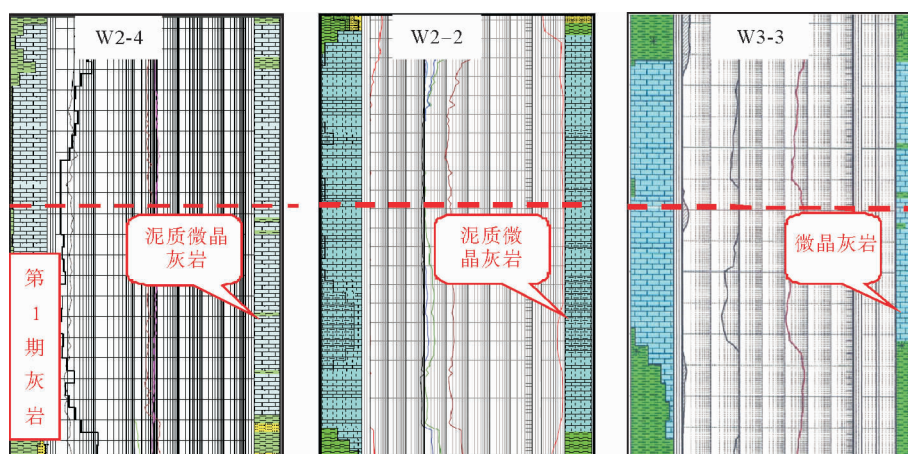


图 13 W2-4、W2-2、W3-3 井的泥浆录井
Fig. 13 The mudlog of W2-4 W2-2 and W3-3

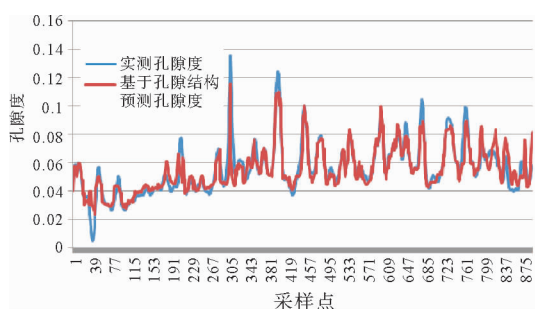


图 14 W2-4 井新方法预测孔隙度与实测孔隙度对比

Fig. 14 The the contrast between porosity by new method predicts and the measured porosity of W2-4

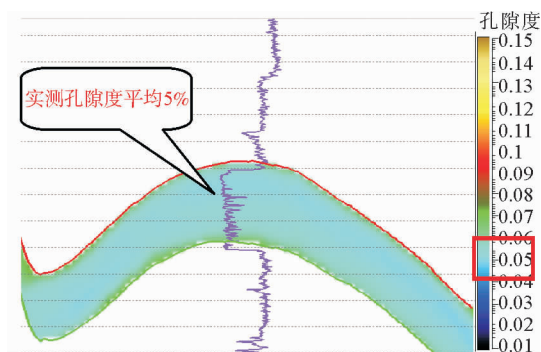


图 15 过 W2-4 井新方法预测孔隙度剖面

Fig. 15 The porosity profile through W2-4 with the new method

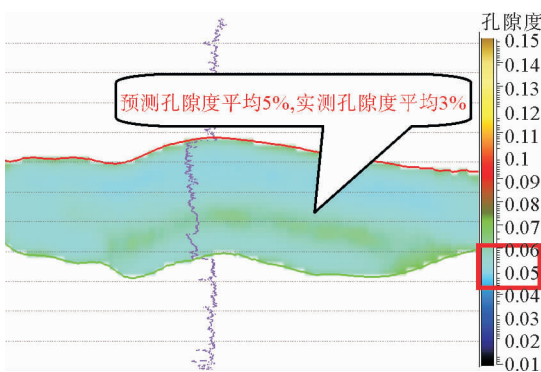


图 16 过 W2-2 井新方法预测孔隙度剖面

Fig. 16 The porosity profile through W2-2 With the new method

3 结论与认识

通过对 Gassmann 方程合理简化并引入 Es-helby—Walsh 干燥岩石椭球包体近似公式,推导

出一种既考虑岩石孔隙结构和压缩系数,又利用信息丰富的叠前弹性参数反演方法来计算储层孔隙度的方法,使得孔隙度计算具有了明确的物理意义,而且精度更高,更加合理。将此方法应用到珠江口盆地碳酸盐岩储层孔隙度预测中取得了较好效果,研究中还充分考虑了不同沉积相带对孔隙结构的影响,进而使得计算参数更加合理,计算结果更符合钻前地质认识,故大大提高了钻前地质综合预测精度,为后期类似的储层预测、钻探部署、储量估算等研究提供了重要依据和基础研究成果。

参考文献:

- [1] 蔡涵鹏,贺振华,何光明,等. 基于岩石物理模型和叠前弹性参数反演的孔隙度计算[J]. 天然气工业, 2013, 33(9): 48-51.
- [2] 高 刚. 基于碳酸盐岩孔隙结构预测孔隙度方法研究[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 921-926.
- [3] 高 刚,贺振华,黄德济,等. 川东北地区碳酸盐岩储层孔隙度预测方法研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(10): 2635-2640.
- [4] Markov M, Levine V, Mousatov A, et al. Elastic properties of double-porosity rocks using the differential effective medium model[J]. Geophysical Prospecting, 2005, 53: 733-754.
- [5] Walsh J B. The effect of cracks on the compressibility of rock[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2012, 70(2): 381-389.
- [6] Eshelby J D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems[C]//Proceedings of the Royal Society A, 1957, 241: 376-396.
- [7] 陈遵德,祝文亮,王卫华,等. 孔隙度预测中的地震特征优化方法及应用[J]. 石油学报, 1999, 20(1): 50-55.
- [8] 王治国,尹 成,雷小兰,等. 预测砂岩孔隙度的地震多属性优化模式对比[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(3): 442-448.
- [9] Wyllie M R J, Gregory A R. Formation factors of unconsolidated porous media: Influence of Particle shape and effect of cementation[J]. Journal of Petroleum Technology, 1953, 5(4): 103-110.
- [10] 刘 洋. 利用地震资料估算孔隙度和饱和度的一种新方法[J]. 石油学报, 2005, 26(2): 61-64.
- [11] He X L, He Z H, Wang R L, et al. Calculations of rock matrix modulus based on a linear regression relation[J]. Applied geophysics, 2011, 8(3): 155-162.
- [12] 蒋 炼,文晓涛,贺振华,等. 礁滩储层内部孔隙结构模型模拟与孔隙度预测[J]. 地球物理学报, 2011, 54(6): 1624-

- 1633.
- [13] 陈 颀,黄庭芳. 岩石物理学[M]. 北京:北京大学出版社, 2001.
- [14] Russel B H. The application of multivariate statistics and neural networks to the prediction of reservoir parameters using seismic attributes [D]. Calgary: Department of Geology and Geophysics, Canada, 2004.
- [15] 覃 豪,李洪娟,杨学峰,等. 基于孔隙结构的酸性火山岩储层流体识别方法研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 422-427.
- [16] 石玉梅,姚逢昌,孙虎生,等. 地震密度反演及地层孔隙度估计[J]. 地球物理学报, 2010, 53(1): 197-204.
- [17] 李 忠,贺振华,巫芙蓉,等. 地震孔隙度反演技术在川西砂岩储层中的应用与比较[J]. 天然气工业, 2006, 26(3): 50-53.
- [18] 于正军,董冬冬,宋维琪,等. 相带控制下协克里金方法孔隙度预测[J]. 地球物理学进展, 2012, 7(4): 1581-1587.
- [19] 王治国,尹 成,雷小兰,等. 预测砂岩孔隙度的地震多属性优化模式对比[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(3): 442-448.
- [20] 张新亮,何丽娟,吴 俊. 基于地震多属性的孔隙度预测[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(4): 385-386.
- [21] 张建芝,林晓华. 基于随机神经网络的储集层孔隙度预测技术在 Y3 区块的应用[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(5): 582-586.

APPLICATION OF NEW METHOD TO PREDICTING CARBONATE POROSITY IN THE ZHUJIANGKOU BASIN

ZHANG Zhiwei, HE Min, CHEN Shenghong, CHEN Zhaoming, XU Chao, YUAN Cai

(Shenzhen Branch of CNOOC (China) Limited, Shenzhen 518054, China)

Abstract: Porosity is critical to reservoir prediction, reservoir description, reservoir estimation and comprehensive reservoir study. It's also a critical technology to accurate estimation of oil reserve. Because of the strong heterogeneity of carbonate rock and strong lateral variation, the porosity prediction has remained a difficult problem for carbonate reservoir. Moreover, the accuracy of conventional method to calculate the porosity is not high enough and the physical meaning is always not so clear, it is hard to meet the needs of exploration and development. Therefore, through the reasonable simplification of the Gassmann equation and the introduction of Eshelby-Walsh dry rock ellipsoidal inclusions approximate formula, we derived a new formula to calculate the porosity. Three parameters, i. e. the pore structure parameters, saturated rock compressibility and rock matrix compressibility are included. Then through the intersection of logging technique charts and the inversion of pre-stack elastic parameters into the pore structure of carbonate and P-wave and S-wave velocity and density in the specific formula, considering the influence of carbonate rock pore structure with different phase, and the new method was applied. The results show that the porosity prediction method of carbonate rock pore structure has higher accuracy than the conventional method based on.

Key words: carbonate porosity; Gassman equation; Eshelby-Walsh equation; pore structure parameters; pre-stack elastic parameters inversion