

常规方法预测碳酸盐岩地层压力的偏差分析

王子振¹, 王瑞和¹, 单 珣¹, 臧艳彬², 张 锐¹, 李明忠³

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101;

3. 中国石化华北石油工程公司井下作业分公司, 河南郑州 450042)

摘要: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,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。基于等效介质理论,计算不同孔隙结构碳酸盐岩的纵波速度,在此基础上,分析孔隙结构导致的常规地层压力预测方法的预测偏差。结果表明:在应力状态、矿物组成和孔隙度相同条件下,裂隙类孔隙使地层压力预测结果偏高,易造成井漏、储层污染等问题;溶孔类孔隙使地层压力预测结果偏低,易诱发溢流、井涌等复杂情况;当裂缝、溶孔共存时,地层压力预测偏差的正负不仅受裂隙与溶孔相对体积比的影响,也受其绝对体积分量的控制;对于复杂孔隙结构碳酸盐岩,油气钻井工程中采用常规的地层压力预测方法和井身结构设计系数存在较大的安全隐患。

关键词:碳酸盐岩; 孔隙结构; 地层压力预测; 纵波速度; 压力偏差

中图分类号:TE 22 **文献标志码:**A

引用格式: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.

WANG Zizhen, WANG Ruihe, SHAN Xun, et al. Uncertainty analysis of pore pressure prediction in carbonate formation using conventional methods[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(5): 96-101.

Uncertainty analysis of pore pressure prediction in carbonate formation using conventional methods

WANG Zizhen¹, WANG Ruihe¹, SHAN Xun¹, ZANG Yanbin², ZHANG Rui¹, LI Mingzhong³

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Research Institute of Petroleum Engineering, SINOPEC, Beijing 100101, China;

3. Downhole Operation Company, Huabei Petroleum Engineering Company, SINOPEC, Zhengzhou 450042, China)

Abstract: The origin of abnormal pore pressure in carbonate rocks is different from that of clastic sedimentary rocks. P-wave velocity and porosity have poor correlation in carbonate rocks, which results in high uncertainty in pore-pressure prediction using common methods. Based on the effective media theory, the P-wave velocity in carbonates with different types of pore structure was calculated, and then the deviation of pore-pressure predicted with conventional methods was analyzed. The results show that under the same stress condition, mineral composition and porosity, the pore-pressure of carbonate formation with crack type porosity tends to be over-estimated, which can cause lost circulation and reservoir damage during drilling. On the other hand, the pore-pressure of carbonate formation with moldic or vug type porosity can be under-estimated, which may lead to well kick or even blowout. For carbonate formations with both crack and moldic types of porosity, whether the predicted pore pressure is under- or over-estimated depends not only on the relative volume fraction of cracks and vugs, but also on their absolute volumes. Therefore, there are safety concerns when conventional pore-pressure prediction method and casing program design method are used during drilling carbonates with complicated pore structure.

收稿日期:2013-11-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51274230);山东省自然科学基金项目(ZR2012EEL01);中央高校基本科研业务费专项资金(14CX02040A);中国石油大学(华东)优秀博士学位论文培育计划

作者简介:王子振(1986-),男,博士研究生,主要从事油气井岩石力学与岩石物理方面的理论与实验研究。E-mail:wzzhprince@126.com。

Key words: carbonate rocks; pore structure; pore-pressure prediction; P-wave velocity; pressure deviation

在油气钻探中,准确可靠的地层压力预测是安全、快速、优质钻井的重要保障。油气钻井工程中现有的地层压力预测方法可分为两大类^[1]:一是直接预测法,将所测物理量与地层压力直接关联,如图版法^[2]、Fillippone 法^[3]等;二是有效应力法,先求解有效应力,再通过 Terzaghi 有效应力公式计算地层压力。根据其求解有效应力方法的不同,又可分为经验法和岩石物理模型法。经验法需确定正常压实趋势线,如等效深度法^[4]、Eaton 法^[5]等;岩石物理模型法基于岩石物理试验建立速度-有效应力模型,如 Bowers 模型^[6]、Gamma-EB 模型^[7]、单点模型^[8]等。这些方法都明确或隐含地采用了基于机械压实机制的速度-孔隙度-有效应力关系^[9],从机制上不适于碳酸盐岩地层。目前尚未建立适于碳酸盐岩的地层压力预测模型,工程实践中仍将这些常规方法应用于碳酸盐岩地层。碳酸盐岩孔隙结构复杂,导致其速度-孔隙度关系分散,增大了地层压力预测结果的不确定性。从已发表的试验数据^[10-16]来看:相同孔隙度条件下,不同孔隙结构碳酸盐岩的纵波速度差别达 2 520 m/s;相同纵波速度条件下,孔隙度差别达 37.05%;孔隙结构对碳酸盐岩速度的影响不可忽略。笔者基于等效介质理论,计算不同孔隙结构碳酸盐岩的弹性波速度,在此基础上,分析孔隙结构导致的常规地层压力预测方法的预测偏差,为钻井工程设计和安全、科学钻井提供理论指导。

1 孔隙结构导致的速度分散

1.1 碳酸盐岩的等效介质模型

岩石的弹性波速度是其弹性特征的客观反映。Kuster 和 Toksöz 基于长波一阶散射理论,考虑不同形状孔隙的影响,建立了估算多孔介质弹性特征的 KT 模型^[17]。模型假设孔隙之间彼此隔离,适于孔隙稀疏分布、高频测量的情况。记 $M = (K, \mu)$, $T = (P, Q)$,KT 模型的一般形式^[18]为

$$(M - M_m) \frac{\left(M_m + \frac{4}{3}R_m\right)}{\left(M + \frac{4}{3}R_m\right)} = \sum_{i=1}^N \varphi_i (M_i - M_m) T_{mi}.$$

(1)

其中

$$R_m = \left(\mu_m, \frac{\mu_m(9K_m + 8\mu_m)}{8(K_m + 2\mu_m)}\right), M_m = (K_m, \mu_m),$$

$$M_i = (K_i, \mu_i), T_{mi} = (P_{mi}, Q_{mi}).$$

式中, μ 、 μ_m 和 μ_i 分别为岩石、背景介质和孔隙流体的等效体积模量, Pa; K 、 K_m 和 K_i 分别为岩石、背景介质和孔隙流体的剪切模量, Pa; φ_i 为第 i 种孔隙的体积分数; P_{mi} 和 Q_{mi} 为第 i 种孔隙对岩石弹性特征影响的几何因数,是孔隙纵横比(α , 孔隙短轴与长轴长度之比)的函数,其计算公式见文献^[17]。

碳酸盐岩的孔隙按照形状和孔隙刚度可划分成孔、缝、洞 3 大类^[19-20]:① 裂隙类孔隙(CF),纵横比小于 0.02,易于压缩变形;② 溶洞、铸模孔(MV),纵横比大于 0.6,刚性强,不易变形;③ 粒间孔、晶间孔(IP),纵横比为 0.1 ~ 0.3,孔隙刚度居中。参考经典 Xu-White 模型^[21]的构建方法,将 KT 模型与微分方法相结合,各类孔隙按照其体积分数的比例同时引入背景介质中,应用 KT 模型^[22]有

$$M(\varphi + \Delta\varphi) - M(\varphi) = \sum_i \frac{\varphi_i}{\varphi_t} \frac{\Delta\varphi}{1 - \varphi} [M_i - M(\varphi)] T_i(\varphi), i = \text{IP, CF, MV}.$$

(2)

式中, φ_t 为总孔隙度; φ_{IP} 、 φ_{CF} 和 φ_{MV} 分别为粒间、裂隙和溶孔孔隙度; $M(\varphi) = (K(\varphi), \mu(\varphi))$,为孔隙度等于 φ 时等效的剪切模量和体积模量, Pa。

该方法每一计算步添加的孔隙度需要满足 KT 模型“低孔隙度”的要求($\Delta\varphi/\alpha < 1$),通过一定次数的迭代后可计算不同孔隙度时复杂孔隙结构多孔介质的弹性特征。

1.2 孔隙结构对碳酸盐岩速度的影响

根据式(2)编写计算程序,采用表 1 中的参数计算不同孔隙结构碳酸盐岩“干”岩心的弹性参数;在此基础上,通过 Gassmann 方程计算水饱和和岩心的弹性参数,进而计算其纵波速度。

表 1 碳酸盐岩矿物和孔隙流体的密度与弹性参数

Table 1 Elastic moduli and density of minerals and fluids in carbonate

介质	体积模量 μ/GPa	剪切模量 K/GPa	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
方解石	76.800 000	32.0	2.710 00
空气	0.000 131	0.0	0.001 19
地层水	2.360 000	0.0	1.050 00

收集了已发表的碳酸盐岩试验数据^[10-16]和川东北地区两口井的碳酸盐岩层测井数据。为了排除岩石矿物组成的影响,所选数据的标准是:方解石含

量大于 90%。如图 1 所示,基于等效介质理论计算的纵波速度-孔隙度结果能很好地涵盖实验室测量数据和测井数据的分布范围。从图 1 中可以看出,在孔隙度相同的情况下,以粒间孔隙为参考,裂隙孔隙度增大,碳酸盐岩的弹性波速度降低,速度偏差为负值;溶洞孔隙度增大,弹性波速度增大,速度偏差为正值;这与 Weger^[16]、Xu^[20] 和 Eberli^[23] 等对试验和测井数据的分析结论吻合。在总孔隙度为 10% 时,引入 20% 的裂隙孔隙产生的速度偏差为-1.224 km/s,相对降低 24.46%;引入相同体积的溶洞孔隙,产生的速度偏差为 0.165 km/s,相对升高 3.30%。因此,碳酸盐岩的速度描述除了考虑孔隙度,还应考虑孔隙结构的影响。如果在地层压力预测中不考虑孔隙结构的影响,低速的裂隙发育层会被误判为异常高压层,而高速的溶洞、铸模孔发育层会被误判为异常低压层。对于同一个区块,如果不同孔隙结构的碳酸盐岩采用相同的速度-孔隙度规律,也很可能预测不出速度上没有异常反应的异常

高压,导致错误的预测结果。

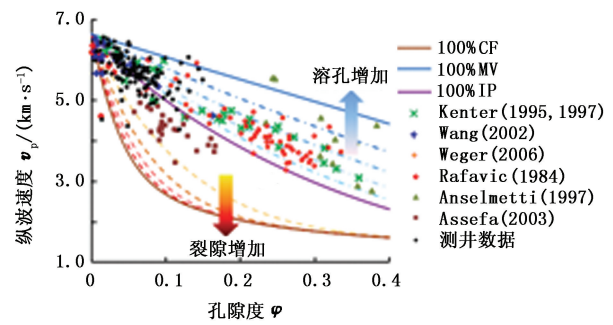


图 1 不同孔隙结构碳酸盐岩的纵波速度-孔隙度关系
Fig.1 Relation between P-wave velocity and porosity in carbonates with different pore structure

2 速度偏差对地层压力预测的影响

2.1 地层压力预测模型

应用较广泛的常规地层压力预测模型如表 2 所示,表中参数取值为 Mario 等^[7] 根据墨西哥湾数据的拟合优选结果。

表 2 常规地层压力预测模型

Table 2 Commonly used pore-pressure prediction models

模型	计算公式	参数取值
Eaton 模型	$p_p = p_o - (p_o - p_w) \left(\frac{v}{v_n} \right)^n$	$n = 2.303$
Bowers 模型	$v = 5\,000 + a p_e^b$	$a = 9.184, b = 0.765$
Gamma-EB 模型	$\frac{p_p - p_{pn}}{p_o - p_{pn}} = c + \left(\frac{v}{v_n} \right)^d + f h$	$c = -0.645, d = -0.922, f = -1.184 \times 10^{-5}$
Fillippone 模型	$p_p = \frac{v_m - v}{v_m - v_w} p_o$	$v_m = 6\,640 \text{ m/s}, v_w = 1\,500 \text{ m/s}$

注: p_p 为地层孔隙压力, Pa; p_o 为上覆岩层压力, Pa; p_w 为静水压力, Pa; p_e 为垂直有效应力, Pa; v 为实测速度, m/s; v_n 为基于正常压实线计算的速度, m/s; v_m 为岩石基质速度, m/s; v_w 为地层水速度, m/s。

在正常地层压力下,对于同一深度 h ,同一孔隙度 φ ,由于孔隙结构不同,碳酸盐岩可能具有速度 v_1 和 v_2 ,应用 Eaton 模型得

$$p_{p1} = p_o - (p_o - p_{pn}) \left(\frac{v_1}{v_n} \right)^n, \tag{3}$$

$$p_{p2} = p_o - (p_o - p_{pn}) \left(\frac{v_2}{v_n} \right)^n. \tag{4}$$

为方便描述,记压力偏差当量密度为 $\Delta\rho = \frac{p_p - p_{pn}}{gh}$,表示地层压力预测值偏离正常压力的大小。取正常地层压力作为参考(即 $v_2 = v_n$),将式(3)、(4)作差,两边同除以 gh ,转化成压力偏差当量密度形式为

$$\Delta\rho = (\bar{\rho} - \rho_w) \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_n} \right)^n \right]. \tag{5}$$

同理可将表 2 中的其他 3 个模型转化为压力偏差当量密度形式。Bowers 模型:

$$\ln \left(\frac{v_1 - v_o}{v_n - v_o} \right) = b \ln \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho} - \rho_w} \right); \tag{6}$$

Gamma-EB 模型:

$$\Delta\rho = (\bar{\rho} - \rho_w) \left[\left(\frac{v_1}{v_n} \right)^d - 1 \right]; \tag{7}$$

Fillippone 模型:

$$\Delta\rho = \frac{v_n - v_1}{v_m - v_w} \bar{\rho}. \tag{8}$$

式(3)~(8)中,正常压实速度 v_n 按照 Wyllie

时间平均方程进行计算^[24-25],即

$$\frac{1}{v_n} = \frac{1-\varphi}{v_m} + \frac{\varphi}{v_w}. \tag{9}$$

正常压实速度对应的等效深度采用形式简单、应用广泛的线性模型^[26-27]计算:

$$v_n(h) = v_0 + kh. \tag{10}$$

对于式(10)中参数的取值,在墨西哥湾地区, Xu 等^[28]推荐 k 取值为 0.6 s^{-1} ; Sayers 等^[29]推荐 k 取值为 $0.5 \sim 0.7 \text{ s}^{-1}$, v_0 取值为 $4\,800 \sim 5\,600 \text{ ft/s}$ 。本文计算中取 $k=0.6 \text{ s}^{-1}$, $v_0=5\,200 \text{ ft/s}$ 。

地层平均密度 $\bar{\rho}$ 为深度的函数,经验公式^[30]为

$$\bar{\rho}(h) = 16.3 + \left(\frac{h}{3\,125}\right)^{0.6}. \tag{11}$$

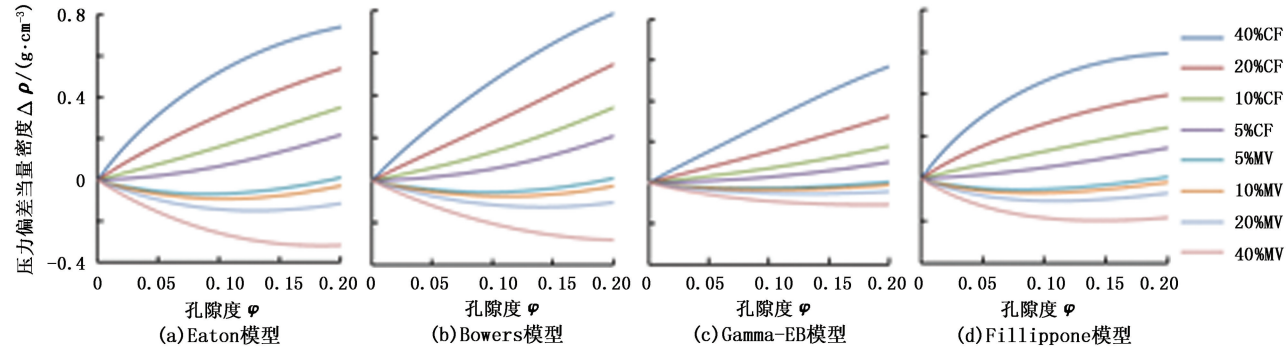


图 2 不同孔隙结构引起的压力偏差当量密度

Fig. 2 Equivalent density of pore-pressure deviation caused by pore structure

如图 2 所示,考虑孔隙结构对碳酸盐岩弹性波速度的影响,4 个模型的地层压力预测结果都会产生偏差,且不同模型压力预测偏差的变化规律一致:在应力状态和孔隙度相同的条件下,裂隙类孔隙使预测压力偏高,压力偏差当量密度为正值;溶孔类孔隙使预测压力偏低,压力偏差当量密度为负值。在总孔隙度为 10% 时,20% 裂隙引起的偏差约为 $+ (0.15 \sim 0.31) \text{ g/cm}^3$; 20% 溶孔引起的偏差约为 $- (0.05 \sim 0.14) \text{ g/cm}^3$ 。在井身结构设计中,地层破裂压力当量密度安全允值一般取 0.03 g/cm^3 ,溢流允值一般取 $(0.05 \sim 0.10) \text{ g/cm}^3$ ^[31]。因此,对于裂缝性地层,地层压力预测结果偏高,容易发生井漏、储层污染等问题;而在溶孔发育的地层,地层压力预测结果偏低,易发生溢流、井涌等复杂情况,甚至会造成井喷事故。对于复杂孔隙结构碳酸盐岩,由于孔隙结构对地层压力预测结果的影响,油气钻井工程中采用常规的地层压力预测方法和井身结构设计系数存在较大安全隐患。

当碳酸盐岩中同时含有裂隙与溶孔时,地层压力预测偏差的正负不仅受裂隙与溶孔相对体积比的

为了与经验系数取值单位统一,式(10)和(11)中深度、速度、密度按英制单位取值。对于某一孔隙度,根据式(9)计算正常压实速度后,采用式(10)和(11)可计算出正常压实条件下对应的地层平均密度。

2.2 结果分析

采用不同孔隙结构碳酸盐岩的纵波速度数据,根据式(3)~(8)计算其对应的地层压力偏差当量密度。计算中裂隙纵横比为 0.02,粒间孔纵横比为 0.1,溶孔纵横比为 0.8。图 2 为以粒间孔为主、引入不同比例裂隙或溶孔时的压力偏差情况。

影响,也受其绝对体积含量的控制。如图 3 所示,当孔隙结构以粒间孔和溶孔为主、含少量裂隙时,随着裂隙在孔隙结构中所占比例增加,预测压力由全部负偏差向全部正偏差逐渐过渡;裂隙在孔隙结构中所占比例越小,预测压力由负偏差变为正偏差的临界孔隙度越大。对于碳酸盐岩裂缝-孔洞型储层,即使是地层压力偏差的定性描述也存在不确定性,其定量描述更为困难。

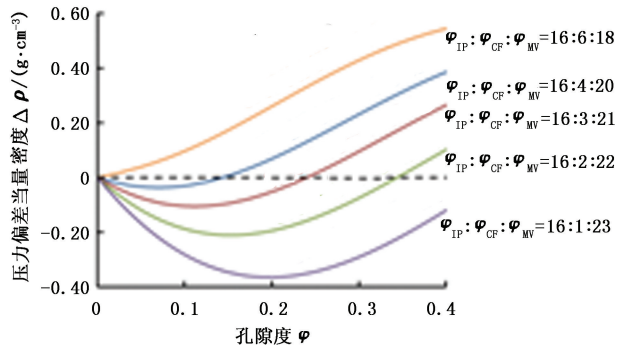


图 3 裂隙与溶孔共存时 Eaton 模型预测的压力偏差
Fig. 3 Pore-pressure deviation under coexistence of cracks and vugs with Eaton model

需要特别强调的是,常规地层压力预测方法从机制上不适用于碳酸盐岩层。在常规地层压力预测方法的基础上,本文中分析的孔隙结构造成的预测结果偏差对现阶段钻井工程设计具有一定的指导作用。岩石物理模型和获取适合的岩石速度是地层压力预测的两个主要内容;岩石物理模型的发展是突破碳酸盐岩地层压力预测的关键。影响岩石弹性波速度的因素众多,速度异常并不一定是地层压力异常的客观反映。针对碳酸盐岩的特点,从影响其弹性波特性的诸多因素中筛选出主要因素,并将这些因素对碳酸盐岩弹性波特性的影响进行定量描述,可为解决碳酸盐岩地层压力预测问题奠定基础。

3 实例分析

以川东北普光气田 A 井为例进行实例分析(图4)。该井在 5.424 ~ 5.675 km 段为飞仙关组白云岩,含少量泥质;钻井资料与测试结果表明该段为正常压实。钻探过程中,该井在 5.459 24 km 和 5.650 7 km 处发生井漏,井漏时钻井液密度为 1.35 g/cm³。

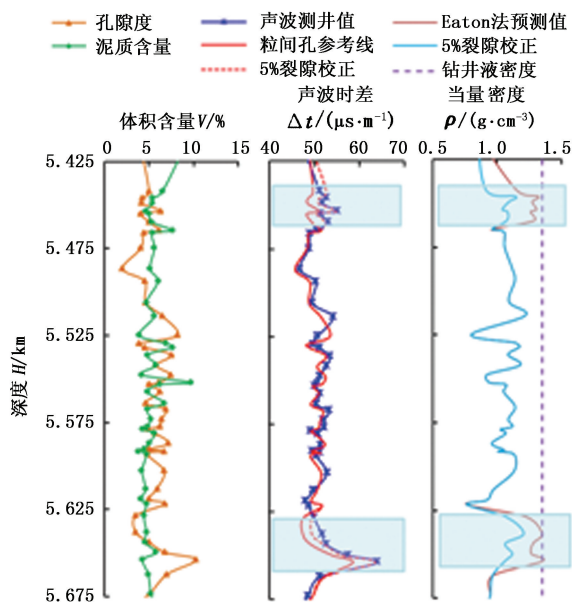


图4 普光气田 A 井实例分析

Fig.4 Example of well A in Puguang gas field

在测井数据解释的孔隙度和泥质含量基础上,根据等效介质理论和式(2)可以计算孔隙全为粒间孔时的声波时差。在 5.442 3 ~ 5.459 8 km 和 5.628 7 ~ 5.662 3 km 井段,测井声波时差值明显大于计算的粒间孔参考值,根据式(2)按总孔隙度中 5% 为裂隙校正后,可与实测声波时差基本吻合,这表明孔隙结构中存在微裂隙。如果不考虑微裂隙的

影响,Eaton 法预测的地层压力当量密度偏高,进而使钻井设计中的钻井液密度偏高,在裂隙发育位置诱发井漏。

4 结 论

(1)根据等效介质理论的计算结果,在孔隙度相同的情况下,以粒间孔隙为参考,裂隙孔隙度增大,碳酸盐岩的纵波速度降低;溶洞孔隙度增大,纵波速度增大。对于地层压力预测,碳酸盐岩的速度描述除了考虑孔隙度,还应该考虑孔隙结构的影响。

(2)采用常规的地层压力预测方法,在裂缝性地层预测压力偏高,容易发生井漏、储层污染等问题;在溶孔发育的地层预测压力偏低,易发生溢流、井涌等复杂情况。当裂缝、溶孔共存时,地层压力预测偏差的正负不仅受裂隙与溶孔相对体积比的影响,也受其绝对体积含量的控制。

参考文献:

- [1] TANG Haixiong, LUO Junfeng, QIU Kaibin, et al. Worldwide pore pressure prediction: case studies and methods [R]. SPE-140954-MS, 2011.
- [2] PENNEBAKER E. S. An engineering interpretation of seismic data [R]. SPE-2165-MS, 1968.
- [3] FILLIPPONE W R. Estimation of formation parameters and the prediction of overpressure from seismic data [C/OL]. Expanded Abstract of 52nd SEG Annual Meeting, Dallas, Texas, 1982:502-503 [2013-05-17]. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1827121>.
- [4] FOSTER J B, WHALEN J E. Estimation of formation pressure from electrical surveys-offshore Louisiana [J]. Journal of Petroleum Technology, 1966, 18 (2): 165-171.
- [5] EATON B A. The equation for geopressure prediction from well logs [J]. Journal of Petroleum Technology, 1975, 24 (8): 929-934.
- [6] BOWERS G L. Pore pressure estimation from velocity data: accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction [J]. SPE Drilling & Completion, 1995, 10 (2): 89-95.
- [7] GUTIERREZ Mario A, BRAUNSDOR Neil R, COUZENS Brent A. Calibration and ranking of pore pressure prediction model [J]. The Leading Edge, 2006, 25 (12): 1516-1523.
- [8] STIERMAN Donald J, HEALY John H, KOVACH Robert L. Pressure-induced velocity gradient: an alternative to a Pg refractor in the Gabilan Range, central California

- [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1979,69(2):397-415.
- [9] DUTTA N C. Geopressure prediction using seismic data: current status and the road ahead [J]. Geophysics, 2002,67(6):2012-2041.
- [10] RAFAVICH F, KENDALL C, TODD T P. The relationship between acoustic properties and the petrographic character of carbonate rocks [J]. Geophysics, 1984,49(10):1622-1636.
- [11] KENTER Jeroen A M, MICHAEL Ivanov. Parameters controlling acoustic properties of carbonate and volcanoclastic sediments at site 866 and 869 [J]. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 1995,143:287-303.
- [12] KENTER Jeroen A M, FOUKE Bruce W, MARC Reinders. Effects of differential cementation on the sonic velocities of upper cretaceous skeletal grainstones (southeastern Netherlands) [J]. Journal of Sedimentary Research, 1997,67(1):178-185.
- [13] ANSELMETTI Flavio S, von SALIS Gian A, CUNNINGHAM Kevin J, et al. Acoustic properties of neogene carbonates and siliciclastics from the subsurface of the Florida Keys: implications for seismic reflectivity [J]. Marine Geology, 1997,144(1/3):9-31.
- [14] WANG Zhijing. Seismic anisotropy in sedimentary rocks, part 2: laboratory data [J]. Geophysics, 2002,67(5):1423-1440.
- [15] SOLOMON Assefa, CLIVE McCann, JEREMY Sothcott. Velocities of compressional and shear waves in limestones [J]. Geophysical Prospecting, 2003,51(1):1-13.
- [16] WEGER Ralf J. Quantitative pore/rock type parameters in carbonates and their relationship to velocity deviation [D]. Coral Gables, Florida: Department of Geological Sciences, University of Miami, 2006:216-218.
- [17] KUSTER G T, TOKSÖZ M N. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media [J]. Geophysics, 1974,39(5):587-618.
- [18] 刘欣欣,印兴耀,张峰. 一种碳酸盐岩储层横波速度估算方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2013,37(1):42-49.
- LIU Xinxin, YIN Xingyao, ZHANG Feng. S-wave velocity estimation method in carbonate reservoir [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013,37(1):42-49.
- [19] KUMAR M, HAN D H. Pore shape effect on elastic properties of carbonate rocks [C/OL]. Expanded Abstract of 75th SEG Annual Meeting, Houston, Texas, 2005:1477-1481[2012-08-25]. <http://dx.doi.org/10.1190/1.2147969>.
- [20] XU S Y, CHEN G L, ZHU Y P, et al. Carbonate rock physics: analytical models and validation using computational approaches and lab/log measurements[R]. IPTC-11308-MS, 2007.
- [21] XU S, WHITE R E. A new velocity model for clay-sand mixtures [J]. Geophysical Prospecting, 1995,43(1):91-118.
- [22] WANG R H, WANG Z Z, SHAN X, et al. Factors influencing pore-pressure prediction in complex carbonates based on effective medium theory [J]. Petroleum Science, 2013,10(4):494-499.
- [23] EBERLI G P, BAECHLE 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.
- [24] WYLLIE M R J, GREGORY A R, GARDNER L W. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media [J]. Geophysics, 1956,21(1):41-70.
- [25] HAMOUZ M A, MUELLER S L. Some new ideas for well log pore-pressure prediction [R]. SPE-13204-MS, 1984.
- [26] SLOTNIK M M. On seismic computations with applications, part 1 [J]. Geophysics, 1936,1(1):9-22.
- [27] SAYERS C M, JOHNSON G M, DENYER G. Predrill pore-pressure prediction using seismic data [J]. Geophysics, 2002,67(4):1286-1292.
- [28] XU Y, GARDNER G, MCDONALD J. Some effects of velocity variation on AVO and its interpretation [J]. Geophysics, 1993,58(9):1297-1300.
- [29] SAYERS Colin M, den BOER Lennert D, NAGE Zsolt R, et al. Well-constrained seismic estimation of pore pressure with uncertainty [J]. The Leading Edge, 2006,25(12):1524-1526.
- [30] TRAUGOTT M. Pore/fracture pressure determination in deep water [J]. World Oil, Deepwater Technology Special Supplement, 1997:68-70.
- [31] 国家发展和改革委员会. SY/T 5431-2008 井身结构设计方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.

(编辑 李志芬)