

天然气勘探

纵横波速度联合预测地层压力的方法及应用

王 斌,雍学善,潘建国,滕团余,尹 路,许多年,黄 玉,孔 旭

(中国石油勘探开发研究院西北分院,甘肃 兰州 730020)

摘要:研究表明,在页岩气中无论是游离气含量还是吸附气含量都随着地层压力的增加而增加,因此开展精细的地层压力预测对提高页岩气的产量有重要意义。目前主要利用纵波速度随着地层压力的升高而降低的特点开展压力预测,但是地层纵波速度的变化并不仅仅由地层压力的变化决定,因此为了建立高精度的地层压力预测模型,分别从杨氏模量和体积模量的定义出发,结合波动方程推导了有效应力与纵波、横波速度之间的关系,开发出了一种新的预测地层压力的方法——弹性参数联合法来计算地层压力。该方法通过引入横波速度,降低了压力预测的多解性,提高了预测的精度,并在页岩气地层中取得了良好的应用效果。

关键词:横波速度;弹性模量;纵波速度;有效应力;异常压力

中图分类号:TE132.1

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2015)02-367-04

引用格式:Wang Bin, Yong Xueshan, Pan Jianguo, *et al.* Methods and application of the formation pressure forecast combining V_p and V_s [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(2): 367-370. [王斌, 雍学善, 潘建国, 等. 纵横波速度联合预测地层压力的方法及应用[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(2): 367-370.]

0 引言

自 Pennebaker 1968 年^[1]在 *World Oil* 上发表论文以来,许多学者研究了地震压力预测方法^[2-4],使得利用地震资料预测地层压力取得了显著的进展。特别是 1986 年 Han 等^[5]结合岩石物理实验通过引入 Terzaghi 有效应力定理预测地层压力促使压力预测技术取得了很大进步。但据刘雯林^[6]1996 年报道, Nur 等模拟了地层是否含气和地层压力变化对纵横波速度的影响,实验结果表明,如果地层含气纵波速度会降低,而横波速度并不降低。而当地层压力增大时,纵波速度和横波速度都会降低。因此,综合利用纵横波速度建立地层压力预测模型有望提高压力预测的精度,降低地震资料的多解性。

1 理论基础

从力学角度讲,沉积物的压实过程受有效应力定理控制,通过分析地下岩石的应力状态可知,上覆地层压力(Overburden Stress, P_{ov})是由岩石颗粒之

间相互接触的有效应力(Effective Stress, σ)和地层压力(Pore Pressure, P_f)来共同支撑的^[7]。

因此,如果计算出上覆地层压力和有效应力,则可以计算出地层压力。上覆地层压力又称静岩压力是指覆盖在某一深度地层以下的地层基岩和岩石孔隙中流体的总重量所造成的对这个地层的压力。有效应力是指作用在地层岩石骨架颗粒上的应力。地层压力又称孔隙压力是指由于沉积物的压实作用,地层中孔隙流体(油、气、水)所承受的压力。

1.1 计算上覆地层压力的方法

全世界各沉积盆地的资料表明,上覆地层压力与埋深呈正比,直线相关性极强^[8]。实际上,上覆地层压力就是上覆地层平均密度与岩层深度的乘积,即:

$$P_{ov} = \rho gh \quad (1)$$

式中: P_{ov} 为上覆地层压力; g 为重力加速度; ρ 为上覆地层平均密度; h 为地层深度。

1.2 计算有效应力的方法

1.2.1 体积模量法

下文从波动方程和初等弹性理论出发推导有效

收稿日期:2013-12-27;修回日期:2014-03-16。

基金项目:国家重大专项专题“天然气复杂储层预测与烃类检测地球物理技术研究和应用”(编号:2011ZX05007-006)资助。

作者简介:王斌(1985-),男,甘肃会宁人,工程师,硕士,主要从事测井技术与沉积储层研究。E-mail: wangbin_xds@petrochina.com.cn。

应力与岩石速度之间的理论关系。首先由纵波波动方程可得:

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (2)$$

式中: V_p 为纵波速度; μ 为剪切模量; ρ 为岩石平均密度; K 为体积模量。

又因为:

$$\mu = \rho V_s^2 \quad (3)$$

式中: V_s 为横波速度。将式(3)代入式(2)得到:

$$K = \rho V_p^2 - \frac{4}{3}\rho V_s^2 \quad (4)$$

同时,由初等弹性理论可知:

$$K = \frac{\sigma}{\Delta V/V} \quad (5)$$

式中: K 为体积模量; σ 为围压应力(就是有效应力,因为地层压力不引起岩石变形,只有有效应力才决定压缩变形程度,所以围压应力就相当于有效应力); $\Delta V/V$ 为体积应变。将式(4)和式(5)合并,并忽略掉地层的横向应变即 $\Delta V/V \approx \Delta H/H$ 可得:

$$\sigma = \rho \frac{\Delta H}{H} \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right) \quad (6)$$

式中: $\Delta H/H$ 为单位厚度压缩量。单位厚度压缩量 $\Delta H/H$ 受埋深的控制,当埋深较浅时, $\Delta H/H$ 随深度增大而增大,当达到一个极大值后, $\Delta H/H$ 随深度增大反而逐渐减小。这个特征实际上符合泥岩的一般压实规律,即浅层时压实作用明显,到达一定深度后,压实作用逐渐减弱。因此,如果某个层位在埋深上起伏不大时,可以认为 $\Delta H/H$ 也是常量。

1.2.2 杨氏模量法

下面从虎克定律和弹性参数的定义出发推导有效应力与岩石速度之间的理论关系。首先由虎克定律可得:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (7)$$

式中: E 为杨氏模量; σ 为有效应力; ϵ 为弹性应变。

根据岩石物理实验,杨氏模量与拉梅系数、剪切模量之间有以下关系:

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad (8)$$

式中: λ 为拉梅系数; μ 为剪切模量。

将式(7)和式(8)合并并考虑到地层在沉积压实的过程中,弹性应变主要为垂向上厚度的变化,因此假定 $\epsilon = \Delta H/H$, 可得:

$$\sigma = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \frac{\Delta H}{H} \quad (9)$$

又因为:

$$\begin{cases} \lambda = \rho(V_p^2 - 2V_s^2) \\ \mu = \rho V_s^2 \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9),建立有效应力与纵横波速度之间的关系:

$$\sigma = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \frac{\Delta H}{H} \quad (11)$$

1.2.3 弹性参数联合法

由于通过体积模量和杨氏模量计算有效应力,均是在一定的假设条件下成立的,因此为了提高有效应力预测的精度,将式(6)和式(11)按照一定比率加权求和建立弹性参数联合法,即:

$$\sigma = f\sigma_E + (1-f)\sigma_K \quad (12)$$

式中: σ 为岩石骨架所承受的有效应力; σ_E 为利用杨氏模量计算求得的有效应力; σ_K 为利用体积模量计算求得的有效应力; f 为加权系数。

2 应用实例

分别利用 Fillipone 法^[9-10]和弹性参数联合法计算了页岩地层中的地层压力^[11],并利用钻井 DC 指数的结果与不同方法计算的压力系数交会拟合(图 1)。

DC 指数^[12]是钻井过程中反映地层可钻性的一个综合指标。它消除了钻压、钻头直径、转盘转速、钻井液密度等影响因素对地层可钻性的影响,实现了把所有钻遇地层的可钻性放在同等钻井条件下进行比较,发现异常高压过渡带,最终做出预测预报。在正常压实情况下,DC 指数随井深的增加而增大。当钻遇异常高压地层时,DC 指数向着减小的方向偏离正常压实趋势线。

其中弹性参数联合法的加权系数通过优选,在研究区选为 0.25,如图 2 所示。从拟合的结果来看,弹性参数联合法的拟合系数高于前人用的 Fillipone 法,拟合系数提高了 4%。

图 3 为利用弹性参数联合法在试验区计算的地层压力随深度的变化趋势,其中蓝色线为上覆地层压力,绿色线为静水压力,红色线为实际计算的地层压力。从图 3(a)可知 S1 井埋深 2 200m 以深开始出现高压异常,其中 2 400m 以深的压力值超过 40MPa,压力系数大于 2 为异常高压地层。从实际测试资料来看,S1 井在井段 2 495~2 498m、2 505~2 508m、2 513~2 516m 射孔,试井外推地层压力 49.877MPa,属异常高压地层。从图 3(b)可知,S2 井地层压力与静水压力相等,无异常高压。S2 井压力计在井深 1 525m 测得压力为 13.918MPa。计算

结果与实测结果相吻合。

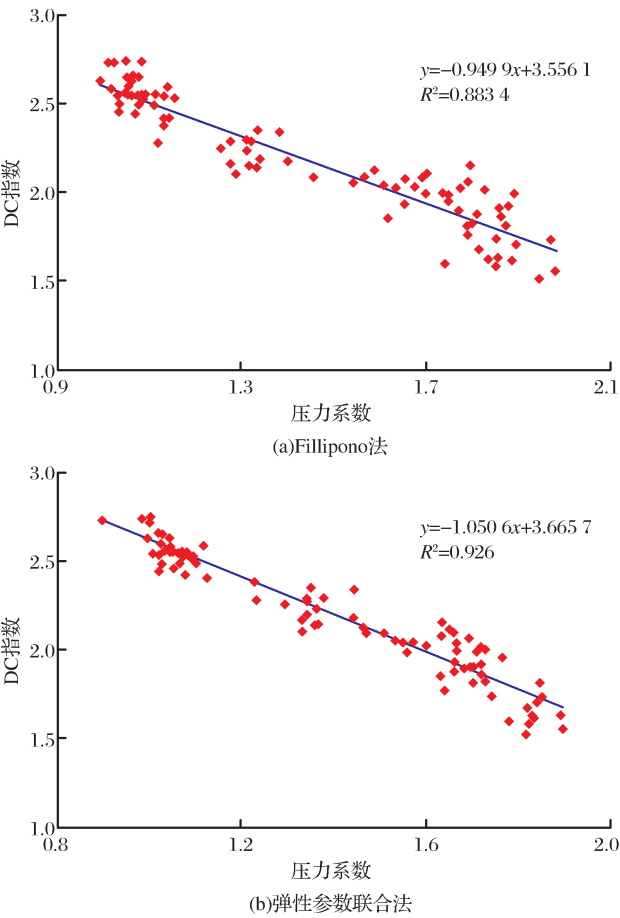


图 1 不同方法计算地层压力系数与 DC 指数交会图
Fig. 1 The crossplot of pore pressure coefficient calculated with different method and the Drilling DC Index

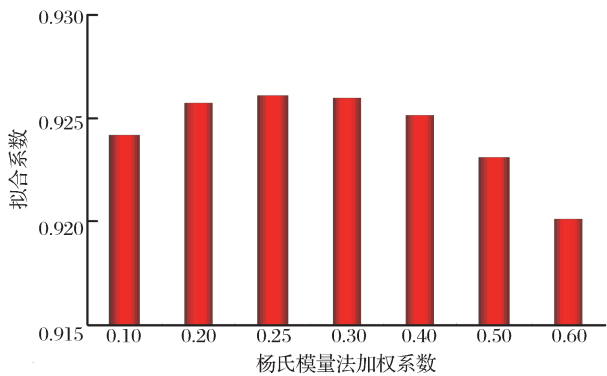


图 2 弹性参数联合法加权系数优选
Fig. 2 Choose the optimal weighted coefficient in the combination method of elastic parameters

图 4 为利用弹性参数联合法计算的分别过 S1 井和 S2 井的压力系数剖面,图中红黄色代表压力系数高,蓝绿色代表压力系数低。从图 4 可知,S1 井区为高压区,在志留系底部压力系数大于 1.45,局部地区超过 2.0。S2 井区在志留系底部以常压为主。

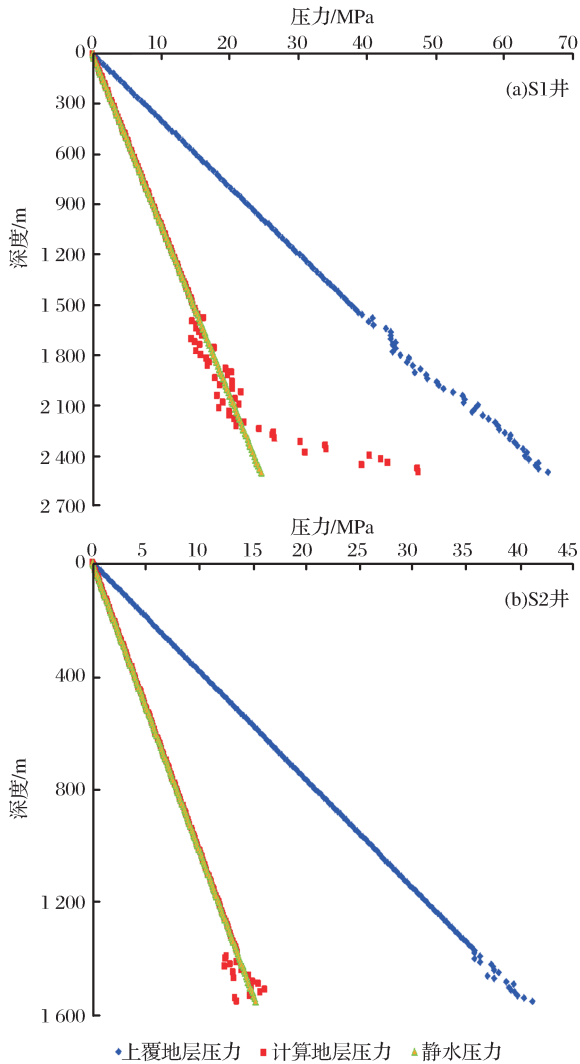


图 3 弹性参数联合法计算 S1 井和 S2 井地层压力剖面
Fig. 3 The pressure profile of well S1 and S2 calculated with the combination method of elastic parameters

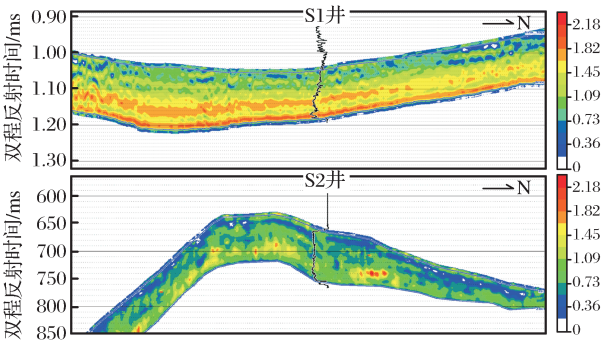


图 4 过 S1 井和 S2 井压力系数剖面
Fig. 4 The pore pressure coefficient profile of well S1 and S2

3 结论

(1)为了消除含气对常规方法预测地层压力的影响,本文分别从杨氏模量和体积模量的定义出发结合

波动方程推导了有效应力与纵、横波速度之间的关系,开发了一种新的计算有效应力的方法——弹性参数联合法。该方法提高了地层压力预测的精度。

(2)利用弹性参数联合法计算了某盆地页岩地层中的地层压力,通过实钻结果证实了该方法的有效性,取得了良好的效果。

参考文献(References):

- [1] Pennebaker. Seismic data depth magnitude of abnormal pressure[J]. World Oil, 1968, (6): 73-77.
- [2] Yang Fan, Yu Xinghe, Li Shengli, *et al.* Distribution characteristics of fluid pressure in Lixian slope, Raoyang Sub-basin and its impact on hydrocarbon accumulations[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(5): 809-814. [杨帆, 于兴河, 李胜利, 等. 饶阳凹陷蠡县斜坡地层流体压力分布规律及其对油气成藏的影响[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(5): 809-814.]
- [3] Zhu Jianjun, Zhang Xiaobao, Zhang Gongcheng, *et al.* A study of abnormal pressure distribution and formation mechanism in Qiongdongnan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(2): 324-330. [祝建军, 张晓宝, 张功成, 等. 琼东南盆地异常压力分布于形成机理探讨[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(2): 324-330.]
- [4] Wang Haiying, Liu Huang, Chang Lunjie, *et al.* Comparison and development of predictive models for dew point pressure of gas condensate reservoir fluids[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4): 853-858. [王海应, 刘煌, 昌伦杰, 等. 凝析气藏流体露点压力预测模型对比与开发[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4): 853-858.]
- [5] Han D H, Nur A, Morgan D. Effect of porosity and clay content on wave velocities in sandstone[J]. Geophysics, 1986, 51(11): 2093-2107.
- [6] Liu Wenlin. Production Seismic Technique[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996. [刘雯林. 油气田开发地震技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.]
- [7] Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1943.
- [8] Liu Zhen. Reservoir Seismic Stratigraphy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997. [刘震. 储层地震地层学[M]. 北京: 地质出版社, 1997.]
- [9] Shao Xinjun, Xu Yun, Lv Zhongfeng, *et al.* A Discussion about the methods for predicting pore pressure[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(3): 100-102. [邵新军, 许韵, 吕中锋, 等. 地层流体压力预测方法的讨论[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(3): 100-102.]
- [10] Zhang Rongzhong. Summary of abnormal reservoir pressure seismic prediction techniques [J]. Petroleum Geophysics, 2005, 3(2): 39-45. [张荣忠. 异常地层压力地震预测技术综述[J]. 油气地球物理, 2005, 3(2): 39-45.]
- [11] Wang Xiang, Liu Yuhua, Zhang Min, *et al.* Conditions of formation and accumulation for shale gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(2): 350-356. [王祥, 刘玉华, 张敏, 等. 页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(2): 350-356.]
- [12] Wang Zhizhan, Gai Shanshan, Xu Aisheng. Two new methods based on DC exponent for abnormal pressure prediction and detection during drilling[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(4): 1429-1433. [王志站, 盖珊珊, 徐爱生. 基于 DC 指数的 2 种异常压力随钻预测新方法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(4): 1429-1433.]

Methods and Application of the Formation Pressure Forecast Combining V_p and V_s

WANG Bin, YONG Xue-shan, PAN Jian-guo, TENG Tuan-yu,

YIN Lu, XU Duo-nian, HUANG Yu, KONG Xu

(Northwest Branch of Research Institute of Petroleum Exploration & Development, CNPC, Lanzhou 730020, China)

Abstract: It suggests that the shale gas content, regardless of the free gas or the adsorbed one, increases with the formation pressure. Therefore, it is of significance to carry out the fine formation pressure forecast to improve the shale gas production. Current studies on the pressure forecast are mainly based on the fact that the P-wave velocity decreases with the increasing formation pressure. The P-wave velocity change, however, depends not just on the formation pressure change. So in order to build a high-precision forecast model of the formation pressure, we start with the definition of the Young's and Bulk modulus, deduce the relationship between the effective stress and the V_p and V_s combined with the wave equation, and develop a new forecast method, Elastic Parameters Combination, to calculate the formation pressure. By introducing the S-wave velocity, this method reduces the multiplicity of the pressure forecast, improves the accuracy, and demonstrates its effectiveness through the application on the shale gas strata.

Key words: S-wave velocity; Elastic modulus; P-wave velocity; Effective stress; Abnormal pressure