

天然气地球物理勘探

井约束地震反演预测地层压力的方法 ——以渤海湾盆地某凹陷为例

管红

(中国石油大学(北京)油气成藏机理与探测国家重点实验室, 北京 102249)

摘要:从异常地层压力的成因机制出发,建立了一种以测井资料为约束条件,利用地震反演技术的地层压力预测方法,其流程包括:①通过不同孔隙度测井曲线的综合对比,再结合地质综合分析,确定研究区地层压力与孔隙度有关;②在满足适用条件的前提下,从多井的测井声波曲线中提取正常变化趋势和地表声波值等参数,绘制平面图来约束预测参数的平面变化;③以测井声波曲线为约束,对三维地震数据体进行速度体反演,保证速度体空间变化的客观性;④以平衡深度法将速度体转化为所需压力数据体。该方法综合了测井资料纵向分辨率高、对区域特点反映强和地震资料空间连续性好的特点,适用于以不平衡压实作用为增压机制和与孔隙度异常有关的地层压力预测。在我国东部新生代盆地的应用显示,压力预测结果符合率高,误差小,对地层压力展布和结构反映清晰,效果良好。

关键词:测井约束;地震反演;压力预测;地层压力;压力成因

中图分类号: TE132.1⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1926(2008)02-0276-04

0 引言

异常地层压力是含油气盆地中的一种重要的地质现象,对异常压力的预测工作不仅涉及油气勘探而且有助于钻井工程的安全。地层压力预测方法包括经验公式法、图版法、地球物理方法和盆地模拟方法,现在主要使用测井和地震资料预测地层压力^[1-4]。使用测井资料预测地层压力精度较好,但受钻井限制难以应用于无井探区;而地震方法则不受钻井分布的限制,但用速度谱提取叠加速度过程中影响因素多,容易造成假象^[4-5],导致 Dix 公式计算的层速度失真,进而影响预测效果。

本文以测井数据约束反演获得层速度体,并用于压力预测。该方法充分结合了测井纵向高分辨率和地震平面数据密集的特点,既克服了测井方法在空间上的局限性,又降低了纯地震方法约束条件较少的弊端,在提高精度的同时对无井探区地层压力进行有效的预测。

1 基本原理

作为一种重要的地质现象,地层压力异常的形成存在多种机制,如不平衡压实、水热增压、生烃增压、黏土脱水和构造挤压^[6-9]等。只有认真分析研究区的增压机制,选取相应的方法,才可能获得良好的预测效果。

地球物理方法通常基于有效应力定律,利用地下孔隙度与地层压力关系进行预测,其机理为不平衡压实。该机理下形成的异常高压地层具有异常(高)孔隙度、低密度的特点。尽管,纵波在地层介质中的传播速度与地层的岩性组合、岩石孔隙度、地层流体性质等因素有关,但总体上纵波速度随地层埋藏深度的加大而增大,符合指数规律^[5],经过校正处理后的纵波波速可以很好地反映砂泥岩地层岩石孔隙度。

封闭地层埋深过程中,孔隙度处于视“停滞”状态,使纵波传播速度偏离正常变化规律,这一“停滞”

阶段的负荷就是孔隙流体承担的剩余压力。

平衡深度就是纵波速异常点在正常变化曲线上投影对应的深度,对应了孔隙度出现异常的深度。根据有效应力定律,地层压力可以表示为:

$$P_z = P_e + (S_z - S_e) \\ = \rho_r \cdot g \cdot Z - (\rho_r - \rho_w) \cdot g \cdot Z_e \quad (1)$$

用速度表示的式(1)为:

$$P_z = \rho_r \cdot g \cdot Z + \frac{(\rho_r - \rho_w) \cdot g}{c} \ln \left(\frac{v_0}{v} \right) \quad (2)$$

式中: Z 为埋藏深度, m; Z_e 为平衡深度, m; P_z 为地层压力, Pa; P_e 为平衡深度处的静水压力, Pa; S_z 为深度 Z 处的地静压力, Pa; S_e 为平衡深度 Z_e 处的地静压力, Pa; g 为重力加速度, m/s^2 ; ρ_r 为负荷岩体平均密度, kg/m^3 ; ρ_w 为地层孔隙水密度, kg/m^3 ; v 为层速度, m/s ; v_0 为地表速度, m/s ; c 为波速正常变化率, m^{-1} 。

应用地球物理方法预测地层压力需要注意以下3个方面。

(1)地球物理方法是以有效应力定律为基础,通过建立孔隙度/波速异常与地层压力关系的方法进行预测。对由于地球化学转变(如生烃作用、矿物脱水等)、不同压力系统导通等增压机理形成的异常压力无法正确预测。

(2)地球物理资料中的低速带可能由于地层含气、断裂裂缝发育、波速异常体造成,甚至处理过程中也会造成假象,因此对研究对象要进行充分的地质分析。

(3)波速的正常变化趋势是预测的关键参数,不同的构造部位、沉积序列都会对其造成影响。因此,尽可能使用实测资料数据,避免用区域平均值。

2 预测步骤

测井法预测地层压力具有纵向分辨率高的特点,但受钻孔的限制难以预测未钻穿地层的压力;数字地震具有高平面密度的特点,但压力预测所使用的参数通常为全区的平均值,缺乏实测参数在空间的约束。

通过测井获得预测所需的波速正常变化率和地表速度等资料,利用测井约束反演获得研究区的速度体,并基于公式(2)来预测地层压力。具体实施步骤如下:

2.1 地质分析

主要目的是确定地球物理法是否适用于研究区。不均衡压实将会造成地层孔隙度异常,测井曲线上反映为低声速(高时差)、低密度、高孔隙度的特

征。上述现象可编制多条测井曲线的综合压实规律曲线进行判别^[9]。此外,地质分析还有一个重要的任务,就是建立合理的地质模型,为以后的反演工作提供基础。

2.2 参数获取

地层压力预测过程中最重要环节是波速正常变化率(c)的确定,该参数可利用声波测井数据编制压实曲线获得。值得注意的是,在编制压实曲线过程中应该充分考虑岩性、地层含气、钻井工程(如井壁垮塌)等因素,尽量选取远离断层,测井质量较好的井。利用气测、GR、SP以及CAL等多条曲线综合对比取值,尽量避免非孔隙度因素造成的假象和异常。在获得不同构造部位的 c 值后,使用趋势面分析法对整个研究区内的参数变化进行预测取值。

2.3 速度体反演

速度体反演是获得高精度地层压力剖面的关键,其核心内容为波阻抗反演。利用工区内的声波测井数据和井旁地震道的地震子波来合成地震记录,完成层位标定后建立单井初始阻抗模型。通过多井分析,调整子波以提高相关性,结合地质分析获得的地质模型建立初始波阻抗模型。还可利用过井的小三维体提取地震特征信息来修改大范围三维波阻抗模型,使反演后井间的波阻抗自然过渡,提高反演的分辨率。之后便可基于初始模型,使用线性或神经网络方法进行波阻抗反演。获得波阻抗数据后可利用全区的 $\rho-v$ 关系或 Garden 公式分离提取层速度体。

2.4 地层压力预测

综合测井获得参数 c , 地震反演获得层速度体,地质分析获得埋深参数,再利用公式(2)便可以获得研究区连续的地层压力剖面。

上述方法优点在于:有可靠的超压形成的理论基础,利用了测井纵向分辨率高、综合对比资料全的特点,克服了常用的地震速度方法(如 Fillipone 法)中参数过于单一的缺点,使预测参数更趋近地质实际。

测井约束条件下的地震反演提高了反演的精度,更好的反映了井间地层压力变化。综合测井参数和地震数据的地层压力预测方法不仅适用于勘探过程中的地层压力分析,还可以为滚动开发提供依据。

3 预测实例

现以我国东部某凹陷的实例说明上述方法的预测效果。研究区钻井分布极不均衡,北部成熟探区

钻井密集, 钻探层位深 (E_{S4+5}), 而南部探区钻井较少, 钻遇层位仅达 E_{d2} , 全区已完成三维地震。实测地层压力显示, 在 E_{d2} (2 500~3 000 m) 及其以下地层中存在高压异常, 压力系数变化范围主要为 1.2~1.5, 最大可达 1.7。通过地层压力预测可以建立成藏动力研究的基础, 为滚动探边提供依据。

研究区是渤海湾盆地的一个次级凹陷, 古近纪以来发生大规模沉降, 凹陷中心沉积了厚逾 5 000 m 的碎屑沉积体系, 边缘部位也可达 3 000 m。东营期中

期处于最大裂陷阶段, 凹陷内沉积了厚层泥质含量较高的地层, 东 2 段中后期形成稳定的厚层湖进泥岩, 地震剖面上呈明显的“铁轨”状, 具区域对比性。可见, 该凹陷符合泥岩不均衡压实的地质条件。

综合压实曲线显示(图 1), 2 750 m 以下有明显的“高时差、低密度、高孔隙度”特征。故可判定, 该凹陷内存在明显的孔隙度异常现象, 孔隙度异常部位与异常压力部位相同。可以通过地球物理方法预测地层压力。

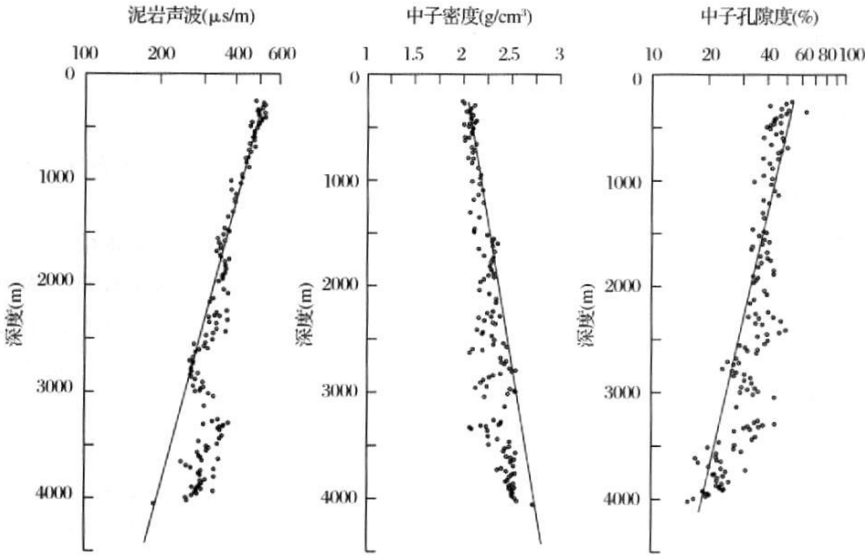


图 1 xx 1 井综合压实曲线

在地质分析基础上, 按照上述步骤完成整个研究区的反演工作, 建立了三维地层压力数据体。

为了检验预测效果, 从地层压力数据体中提取了 50 个点, 与实测压力 (RF T) 对比(图 2a)。检验数据主体范围压力系数为 1.05~1.4, 基本符合正态分布, 检验具有显著性。检验结果显示(图 2b),

总体预测效果较好, 预测结果的绝对误差在 4 MPa 以内, 最大相对误差为 12% 以内, 80% 以上的预测结果相对误差小于 8%。预测的绝对误差呈随机对称分布于零值周围, 说明预测具有较好的稳定性。可见, 测井约束地震反演方法获得的地层压力具有相当的可靠性。

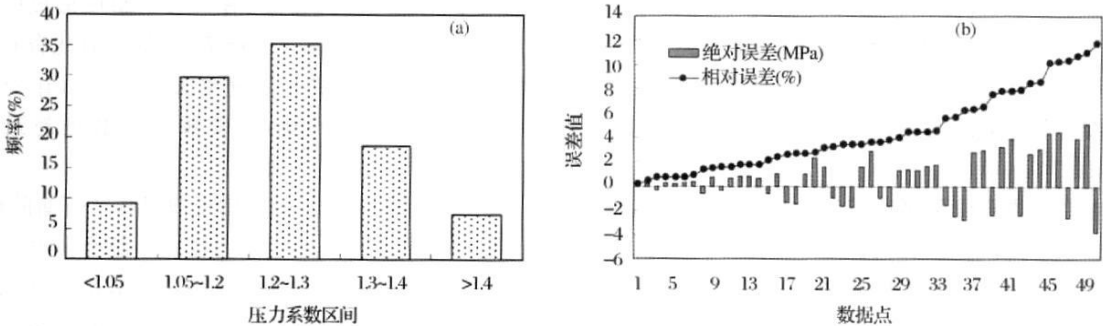


图 2 预测样品分布区间及误差分布

(a) 地层压力数据; (b) 预测误差

从预测的地层压力系数剖面(图 3)可以看出, 预测结果压力系数平面连续性好, 清楚地反映出凹

陷中地层压力呈现“南高北低”的趋势, 异常地层压力出现的深度不一, 凹陷边缘的生长性断层附近地

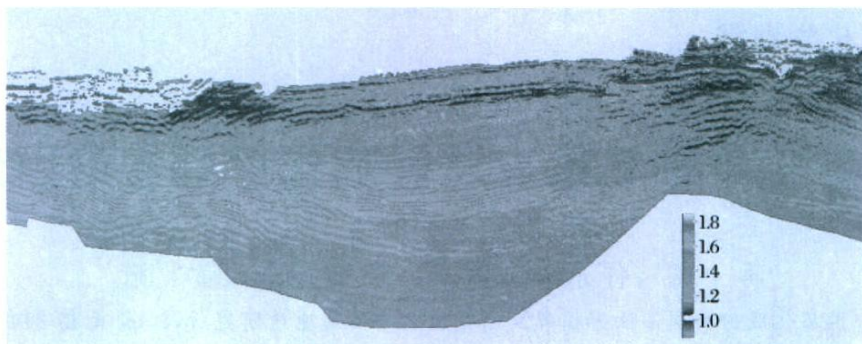


图3 预测压力系数剖面

层维持静水压力等现象;纵向分辨率较高,边界生长断层上升盘及凹陷中部存在3个明显的超压带,但在南部则仅存在一个较明显的超压带。可见,该方法有较好的应用效果,这对压力系统和成藏体系的研究工作提供了很好的基础资料。

4 结论

(1)井约束地震反演预测地层压力方法把测井信息和地震数据有机地结合起来,很大程度上克服了传统单一使用测井或地震资料预测地层压力的缺陷,同时保留了各自的特点。该方法在最大程度遵循地质实际的基础上,提高了预测精度,将地层压力的预测立体化,使之更好地指导勘探工作。

(2)地球物理方法(如本文介绍的方法)是以孔隙度与地层压力之间的关系为基础的,使用该方法必须加强地质分析,只有符合上述成因机制才可应用。此外,在参数求取中只有加强地质综合分析,方能提高预测精度。

(3)本文介绍的方法原理清晰,计算过程简便,既适用于多井开发区,也可应用于少井的勘探新区,在

我国东部的新生代断陷盆地中得到了很好的应用。

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.
- [2] 王兴岭,冯斌,李心宁.井约束地震压力预测在滚动勘探开发中的应用[J].石油地球物理勘探, 2002, 37(4): 391-394.
- [3] 张荣忠,郭良川,常辉.孔隙压力地震预测方法综述[J].勘探地球物理进展, 2005, 28(2): 90-98.
- [4] 刘震.储层地震地层学[M].地质出版社, 1997: 206-218.
- [5] 孙家振,李兰斌.地震地质综合解释教程[M].中国地质大学出版社, 2002: 99-112.
- [6] 胡海燕.超压的成因及其对油气成藏的影响[J].天然气地球科学, 2004, 15(1): 99-102.
- [7] 万志峰,夏斌,何家雄等.沉积盆地超压形成机制及其对油气运聚成藏过程的影响[J].天然气地球科学, 2007, 18(2): 219-223.
- [8] 曹华,龚晶晶,汪贵锋.超压的成因及其与油气成藏的关系[J].天然气地球科学, 2006, 17(3): 422-425.
- [9] Mark J. Osborne, Richard E Swarbrick. Mechanisms of Generating Overpressure in Sedimentary Basins: A Reevaluation [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(6): 1023-1041.
- [10] 宋岩,王毅.天然气运聚动力学与气藏形成[M].北京:石油工业出版社, 2002: 128-132.

Formation Pressure Prediction with Well-Constrained Seismic Inversion: A Case from a Sag in Bohai Bay Basin

GUAN Hong

(State key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation Mechanism and Exploration, China University of Petroleum,
Beijing 102249, China)

Abstract: The formation pressure prediction with well-constrained seismic inversion data can be applied to abnormal porosity formations in which abnormal pressures derive from disequilibrium compaction action. Firstly, identify the mechanisms of abnormal pressure and make sure that it is related to disequilibrium. Secondly, map the normal trend distribution of sonic-velocity and velocity on surface using sonic-log data. Both of them are the important parameters in this method. Thirdly, extract bed velocity body with well-constrained seismic inversion. After that, formation pressure can be calculated by balance-depth equation.

Key words: Well-constrained; Seismic inversion; Pressure prediction; Formation pressure; Pressure genesis.