

doi:10.11720/wtyht.2015.2.22

时磊,刘俊州,董宁,等.扩展弹性阻抗反演技术在致密砂岩薄储层含气性预测中的应用[J].物探与化探,2015,39(2):346-351.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.2.22

Shi L, Liu J Z, Dong N, et al. Extended elastic impedance inversion technology and its application to the tight and thin sandstone reservoir[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(2):346-351. http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.2.22

扩展弹性阻抗反演技术 在致密砂岩薄储层含气性预测中的应用

时磊,刘俊州,董宁,王箭波,夏红敏,王震宇
(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘 要:与叠后反演相比,叠前弹性阻抗对储层或烃类更为敏感,而扩展弹性阻抗反演是一种利用振幅随偏移距变化来分析、识别岩性和含气性的有效方法技术。笔者论述了扩展弹性阻抗反演方法理论和反演关键技术、步骤,并针对鄂尔多斯盆地北部 DND 气田盒 1、山 2 段典型致密砂岩气藏的含气预测,提出了一套融合技术思路进行横波估测,该方法将公式法、模型法和神经网络法结合,以便在砂岩段使用模型法估算,在泥岩段以公式法为低频约束,同时结合神经网络法来预测泥岩段横波信息,避免了 Xu-White 模型由于总孔隙度测量不准确造成的泥岩段预测误差。实际应用表明,该方法能够满足致密砂岩薄储层含气预测,准确地预测了含气砂体的展布情况,预测结果与实钻吻合率高达 90%。

关键词:致密砂岩;薄气层预测;扩展弹性阻抗反演;横波估测

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2015)02-0346-06

致密砂岩气已成为全球非常规天然气勘探的重点领域^[1-2],而致密砂岩气藏的识别是油气地球物理勘探中最难的研究课题之一,尤其是致密薄储层含气性的识别,国内外均处于不断探索研究中。目前,致密砂岩含气性检测研究主要是在叠前弹性参数反演和地震衰减技术两个方面^[3-4]。

弹性阻抗反演利用不同入射角的地震叠加数据,保留了储层的 AVO 信息,与叠后地震反演相比,弹性阻抗对储层和烃类更为敏感^[5-6]。随着 AVO 技术的发展,它在裂缝检测、油气预测、储层非均质研究方面得到了广泛的应用^[7]。

扩展弹性阻抗反演是由 Whitcombe 提出,他对 Connolly 的弹性阻抗方程进行了归一化及修正,使的不同角度的弹性阻抗值与叠后波阻抗在一个数量级上。同时,也将反射系数限制在 $[-1,1]$ 之间,与实际地震反射系数相符,并可用于流体和岩性检测^[8]。

国内一些专家如苑书金、刘百红等^[9-10]也开展

了大量的弹性阻抗技术的应用研究,取得了一定的成果。但这些成果都基于确定性弹性阻抗反演方法,其分辨率与地震资料分辨率相当,对于薄气层检测效果不佳。笔者提出利用叠前随机扩展弹性阻抗反演方法解决薄气层预测难题,在确定性扩展弹性阻抗反演可靠的基础上,统计地下地质体的变差、变程,应用确定性反演结果作为约束完成叠前随机反演,将该方法应用于鄂尔多斯盆地 DND 气田气层检测中,预测结果与实钻吻合很好。

1 扩展弹性阻抗理论

1999 年,Connolly 由两项和三项 Zoeppritz 线性方程推导得到了弹性波阻抗 EI 公式^[11],它保留了地震反射波振幅随偏移距变化的 AVO 信息,使得 AVO 反演可行有效,其弹性波的近似表达式为

$$I_E(\theta) = v_p^{(1+\tan^2\theta)} v_s^{-[8(v_s/v_p)^2\sin^2\theta]} \rho^{[1-4(v_s/v_p)^2\sin^2\theta]},$$

I_E 表示弹性阻抗,它是纵横波速度、密度和入射角度的函数。该公式求取的 I_E 值存在随着入射角的

增大急剧降低的问题,这样在进行近、远炮检距弹性阻抗值分析时可能会掩盖流体或岩性变化差异的信息,因此,在综合分析声波阻抗与弹性波阻抗时,首先需要将弹性波阻抗变换为声波阻抗,这给实际工作造成了不便。

2002 年,Whitcombe 采用归一化处理消除 I_E 值随着入射角变化而变化的影响,归一化弹性阻抗表达式为^[8]

$$I_E(\theta) = v_{p0}\rho_0 \left[\left(\frac{v_p}{v_{p0}} \right)^{1+\sin^2\theta} \left(\frac{v_s}{v_{s0}} \right)^{-8\left(\frac{v_s}{v_p}\right)^2\sin^2\theta} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1-4\left(\frac{v_s}{v_p}\right)^2\sin^2\theta} \right]$$

式中,常数因子 v_{p0} 、 v_{s0} 、 ρ_0 分别为纵波速度、横波速度和密度的平均值。用上式计算的弹性波阻抗值归一化到声波阻抗的数量级上,解决了阻抗值随入射角发生变化的问题,但是其对应的反射系数可能大于 1,这与实际的地震记录不符。

随后 Whitcombe 再次修正了归一化方程,将原反射系数乘以一个因子 $\cos \chi$,并使得 $\tan \chi = \sin^2 \theta$,提出了扩展弹性波阻抗的概念,其方程为^[8]

$$I_{EE}(\chi) = v_{p0}\rho_0 \left[\left(\frac{v_p}{v_{p0}} \right)^{\cos \chi + \sin \chi} \left(\frac{v_s}{v_{s0}} \right)^{-8k\sin \chi} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\cos \chi - 4k\sin \chi} \right]$$

显然,弹性阻抗 I_{EE} 是纵波 v_p 、横波 v_s 、密度 ρ 和入射角 θ 的函数,因此,利用叠前保幅 CRP 道集数据,可以求得方程中的参数 $I_{EE}(\theta)$ 和入射角参数,通过方程组的求解,进而得到纵波速度、横波速度、密度。由于扩展弹性阻抗 I_{EE} 与声阻抗在同一数量级,且消除了 I_E 在远、中、近道集数值变化剧烈缺点,能够精确揭示流体或岩性信息。

2 扩展弹性阻抗反演关键技术

测井横波信息及地震叠前道集是扩展弹性阻抗反演的两个基础。首先,在横波准确估算的基础上,对叠前道集进行分角度叠加处理,得到不同角度的叠加数据;其次,针对不同角度叠加数据提取子波,完成叠前反演;最后利用不同角度道集反演结果,求取地震资料的弹性参数信息。该反演过程的横波估算及反演方法的选择至关重要。

2.1 横波估测

横波信息是弹性阻抗反演中很重要的参数之一。横波资料的品质关系到叠前地震反演的结果是否可靠,流体识别是否可信^[12]。然而,在实际工作中,由于各种原因往往缺乏横波资料,所以,在叠前反演之前,要完成横波估算。目前,横波预测方法主要有四方面:①孔隙度、泥质含量公式,这类公式一般来自于实验室测量结果,其中包括 TOSAYA

(1982),HAN (1986)等,通过拟合纵横波的速度和孔隙度、泥质含量的关系来计算纵横波的速度;②从纵波速度预测横波速度,其中,有 Castagna(1985)泥岩趋势线、Greenberg-Castanga(1992)砂泥岩公式等,近似 Gassmann 方程法也属此类;③神经网络方法,此方法用已有的几条测井曲线来训练神经网络,再由训练好的神经网络来计算横波速度;④理论模型法,常用的 Xu-White 模型(1996)从矿物的组成入手,综合几种理论方法,考虑了泥质砂岩中基质性质、泥质含量、孔隙度大小和孔隙形状以及孔隙饱和度流体性质对岩石速度的影响^[13]。

对于上述四种方法,目前常用的理论模型法需要建立精准的岩石模型,而模型中的总孔隙度很难测准,尤其是在泥岩段,所以泥岩段预测结果往往存在较大误差。为此,文中采用融合技术解决横波估算问题。所谓的融合是指在砂岩段及泥岩段采用不同的方法估算,最后将二者估算结果合并。在研究过程中,砂岩段采用 Xu-White 模型法估算横波;泥岩段采用公式法作为低频约束,结合神经网络法来预测横波信息。借鉴从纵波速度预测横波速度的方法,由具有实测纵横波速度、密度的测井资料建立纵波速度与横波速度的经验关系,利用纵波信息确定横波资料,作为泥岩段的低频趋势,同时,结合神经网络法来预测泥岩段横波信息,从而有效的避免泥岩段预测误差问题;结合模型法和神经网络法结果,能够有效地预测缺失的横波信息。

2.2 随机扩展弹性阻抗反演

随机反演方法是将随机模拟的思想引入地震反演中,以地震数据作约束,用随机模拟算法得出属性数据体,从而实现储层预测。随机反演更多的融入了测井信息,提高反演结果的纵向分辨率,可以很好地解决薄储层预测难题。目前,储层随机反演技术已经得到地质学家及油田工程师的广泛认可,并在国内、外许多复杂油气藏开发中起到了积极的作用^[14-15]。

由于随机扩展弹性阻抗反演以叠前扩展弹性阻抗确定性反演数据为约束,所以,要先进行叠前确定性反演。首先,对叠前道集进行分角度叠加,分别提取不同角度的子波,这要求子波与地震具有较高吻合度,从而完成不同角度的叠后反演,进而得到 Zoeppritz 方程中不同角度的振幅参数,对其求解;其次计算出纵、横波阻抗、密度等一系列弹性参数数据体;最后,还要与测井资料对比,以确定反演成果的合理性。其反演流程如图 1。

扩展弹性阻抗确定性反演得到的结果忠实于地

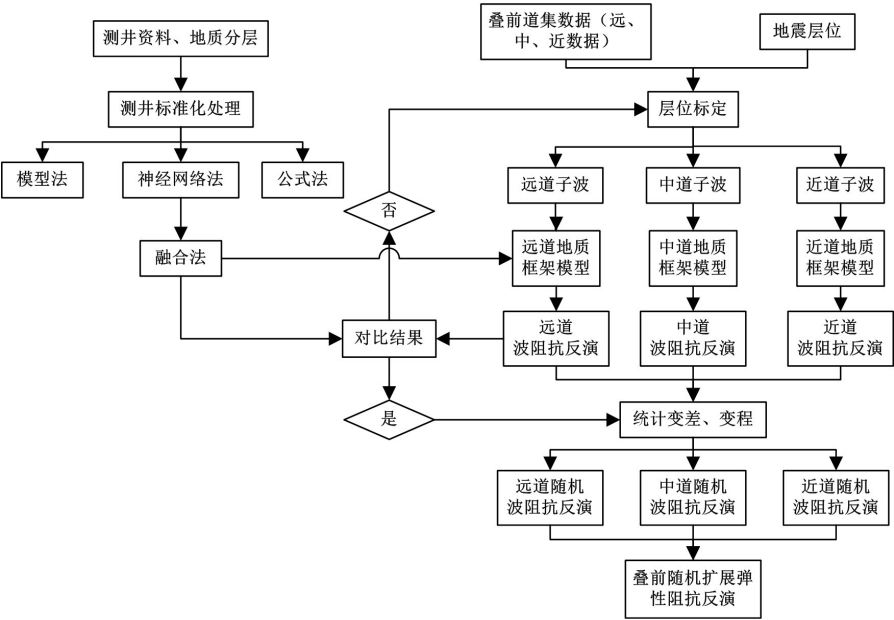


图 1 叠前随机扩展弹性阻抗反演流程

震的响应,也受制于地震资料的限制,分辨率较低。为解决地震资料的分辨率低的问题,采用随机扩展弹性阻抗反演方法对测井、地震数据做进一步的融合。变差函数是随机反演的重要参数^[15],它主要由变差、变程两个参数组成,文中利用确定性反演结果,来确定随机反演的横向变差变程,而纵向变差函数参数通过分析测井储层厚度来确定。叠前随机扩展弹性阻抗反演可以满足薄储层预测的要求。

3 应用实例

鄂尔多斯盆地是典型的低孔、低渗、致密气藏,其北部的 DND 气田储层平均孔隙度为 8.4%,渗透率低于 1 毫达西。该区气层虽分布广,但厚度薄,丰

以下。随着气田的深入开发,在下石盒子组盒 1 段及山西组山 2 段,其砂体厚,气层薄的矛盾日益突出,因此,对气层的精确预测意义重大。本次研究采用随机扩展弹性阻抗反演方法解决薄气层预测问题。

首先,横波预测。分析 DND 区块所有测井资料,利用融合方法进行横波预测,同时,融合法的结果也可以检测出实测横波有误的测井,进而对实测测井资料进行修正。图 2 为 A 井横波预测结果,在黑框标注泥岩段范围内,由于测井未做泥岩段孔隙度解释,模型法结果(粉红色)与实测(黑色)结果误差较大,而融合法(红色)预测横波速度与实测横波速度在砂岩段和泥岩段吻合较好。

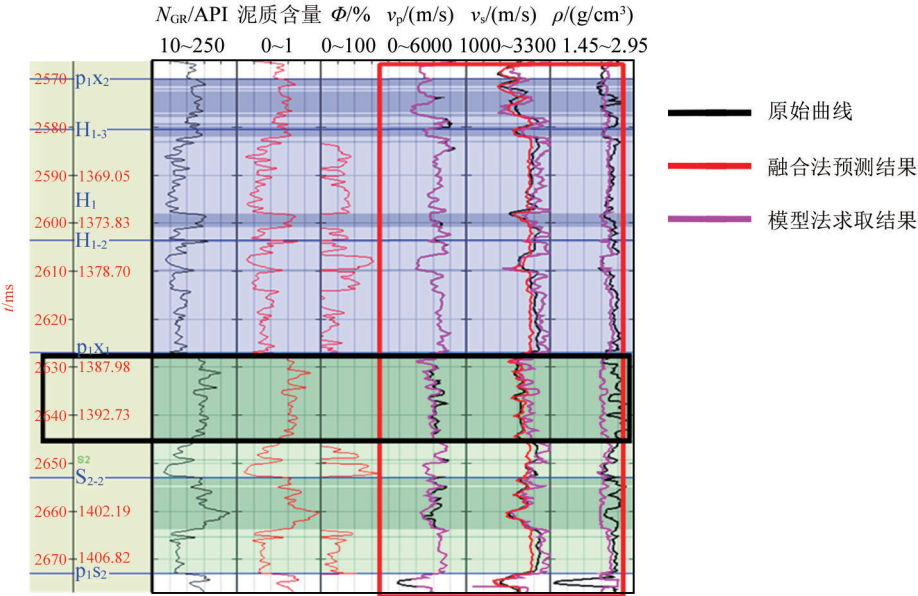


图 2 A 井横波预测对比分析

其次,交会分析和反演。利用各种测井参数、弹性参数的交会图来分析气层、干层、泥岩测井响应特征、叠前扩展弹性阻抗反演能否起到评价储层岩性、物性和检测气层的作用以及为后续岩性物性流体解释提供有效的参考范围。通过大量的交会分析发现,区块砂岩具有低纵横波速度比、高纵波阻抗的特征;而含气层具有低纵横波速度比、低纵波阻抗特征;通过纵横波速度比与声阻抗交会分析确认,纵横波速度比属性变化可以区分出含气砂岩。图 3 为声阻抗与纵横波速度比交会,从图上可以看出,纵横波速度比能够很好的区分出砂泥岩及气砂,其中,气砂的有效值在 1.6 以下,而 1.6~1.7 之间仅有少量气砂。

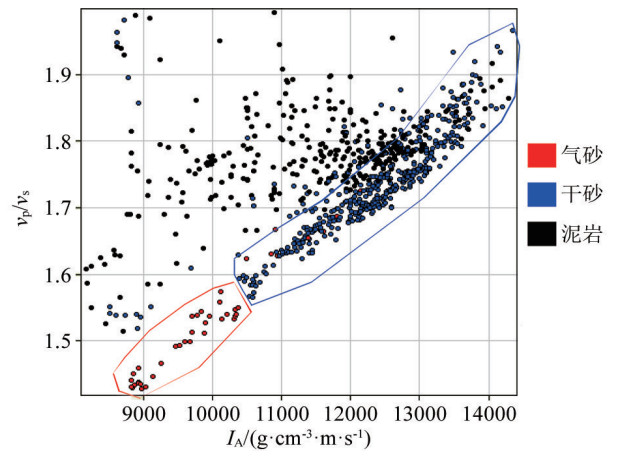
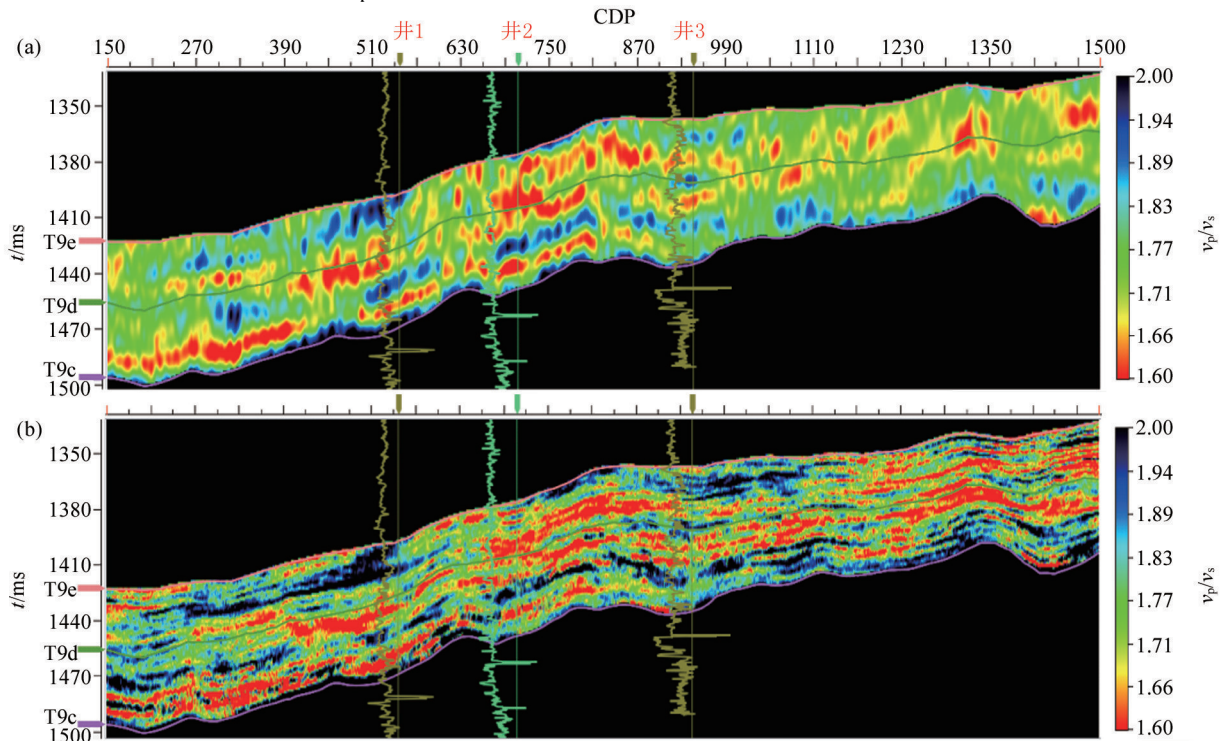


图 3 工区内盒 1 段和山 2 段测井 v_p/v_s 与 I_A 交会分析

同时,通过交会分析也发现,采用纵横波速度比和纵波阻抗数据体可以联合解释以确定砂体分布范围。

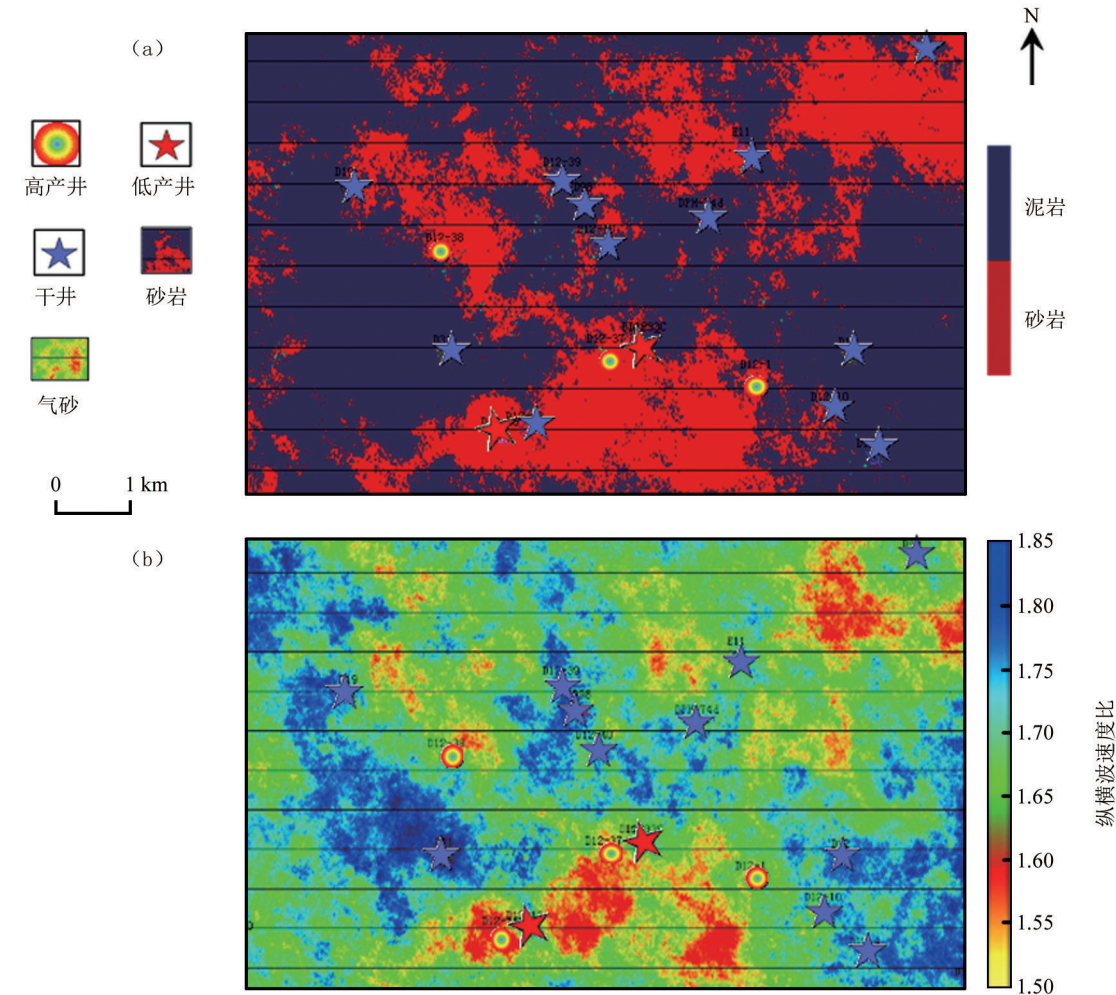
应用扩展弹性阻抗反演得到了地下岩石的弹性参数,如纵波阻抗、横波阻抗、密度、纵横波速度比、 λ 等,但受地震资料的分辨率限制。研究区地震资料主频仅为 25 Hz,目的层段速度为 4 000 m/s,反演能分辨的砂体厚度为 20 m。为提高分辨率,进行随机扩展弹性阻抗反演,但要注意的是:随机扩展弹性反演要以确定性扩展弹性阻抗反演为基础,以确定性扩展弹性阻抗反演来确认随机反演的变差、变程,进而保证随机扩展弹性阻抗反演结果与确定性弹性阻抗反演的结果趋势一致,只是薄层得到更好的刻画。从图 4 的两种反演结果可以看出,叠前随机扩展弹性反演结果(图 4b)与叠前扩展弹性确定性反演(图 4a)在横向上规律一致,在纵向上分辨率有较大的提高,能够满足 5 m 左右薄储层预测的要求。

最后,交会解释和属性分析。利用反演得到的纵波阻抗数据体和纵横波速度比数据体,采用交会解释分析技术,提取盒 1 段和山 2 段平面属性。图 5 显示的为盒 1 段声阻抗与 v_p/v_s 交会解释,提取的砂岩与气砂岩平面图,与已钻井统计(将试气无阻流量高于 4 万 m^3/d 定义为高产井,无阻流量 0~4 万 m^3/d 定义为低产井,其它为无气层井),吻合率达 90% 以上,验证了该技术的有效性。



a—叠前扩展弹性阻抗确定性反演;b—叠前随机弹性扩展阻抗反演

图 4 两种不同的叠前扩展弹性反演结果对比



a—盒 1 段砂岩平面分布;b—盒 1 段含气砂岩平面分布

图 5 纵波阻抗与 v_p/v_s 交会解释结果

4 结论

(1)扩展弹性阻抗反演充分利用了地质体的弹性信息及叠前道集的振幅随偏移距变化响应特征,预测岩性及流体准确度高;而随机扩展弹性阻抗反演将测井、地震资料结合,反演结果分辨率高,能够解决薄气层预测问题。

(2)融合模型法、经验公式法以及神经网络法的技术体系预测横波资料精度高,克服了泥岩段预测误差。

(3)随机扩展弹性阻抗反演能够满足致密砂岩薄储层含气预测,准确地预测了含气砂体的展布情况,对 DND 气田盒 1、山 2 段气层预测中效果显著,预测结果与实钻吻合率高达 90%,在其它薄储层地区有很好的借鉴作用。

(4)随机扩展弹性阻抗反演一定要以确定性反演为约束,而且井控程度越高,变差变程估算越准确,反演结果越精确。

本文方法建议在开发阶段采用。

参考文献:

[1] 董晓霞,梅廉夫,金永旺.致密砂岩气藏的类型和勘探前景[J].天然气地球科学,2007,18(3):351-354.

[2] 张国生,赵文智,杨涛,等.我国致密砂岩气资源潜力、分布与未来发展地位[J].中国工程科学,2012,14(6):87-93.

[3] 马劲风.地震勘探中广义弹性阻抗的正反演[J].地球物理学报,2003,46(1):118-124.

[4] 苑书金,董宁,于常青.地震波衰减技术在鄂尔多斯盆地储层预测中的应用[J].石油物探,2006,45(2):182-188.

[5] 甘利灯,赵邦六,杜文辉,等.弹性阻抗在岩性与流体预测中的潜力分析[J].石油物探,2005,4(5):504-508.

[6] 苑书金,董宁,于常青.叠前联合反演 P 波阻抗和 S 波阻抗的研究和应用[J].石油地球物理勘探,2005,40(3):339-342.

[7] 苑闻京.叠前反演和地震吸收技术在复杂天然气藏地震预测中的应用[J].地球物理学进展,2012,27(3):1107-1115.

[8] Whitcombe D N.Extended elastic impedance for fluid elastic impedance for fluid lithology prediction[J].Geophysics,2002,67(1):63-67.

[9] 苑书金.叠前地震反演技术的进展及其在岩性油气藏勘探中的应用[J].地球物理学进展,2007,22(3):879-886.

[10] 刘百红,李学云,李建华,等.弹性阻抗反演在储层含气性预测中的应用[J].石油地球物理勘探,2012,47(s1):72-78.

[11] Connolly P.Elastic Impedance[J].The Leading Edge,1999,18(4):438-452.

[12] 喻永生,熊家林,孙晓庆,等.横波估算方法探讨[J].复杂油气藏,2012,5(4):27-30.

[13] Xu S Y,White R.A physical model for shear-wave velocity prediction[J].Geophysical Prospecting,1996,44(4):687-717.

[14] 张永刚.地震波阻抗反演技术的现状和发展[J].石油物探,2004,41(4):385-390.

[15] Grana D,Dvorkin J.The link between seismic inversion, rock physics, and geo-statistical simulations in seismic reservoir characterization studies[J].The Leading Edge,2011:54-61.

Extended elastic impedance inversion technology
and its application to the tight and thin sandstone reservoir

SHI Lei, LIU Jun-Zhou, DONG Ning, WANG Jian-Bo, XIA Hong-Min, WANG Zhen-Yu
(Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Compared with the post-stack inversion, the extended elastic impedance is more sensitive to the reservoir and hydrocarbon. In this paper, the authors discussed the theory, key techniques and steps of the extended elastic impedance inversion. We take P_1x_1 and P_1s_2 in DND gas field of North of Erdos Basin were taken as the study objects. Based on a detailed analysis of logging data, the authors propose fusion method for estimating data of shear wave. This method combines modeling method, formula method and neural network method. It estimates the sandstone section using modeling method, and mudstone with formula method for low frequency model and, in combination with neural network, predicts the mudstone section of shear wave information, thus avoiding the error of mudstone caused by total porosity measurement inaccurate prediction using Xu-White model. Based on cross pictures analysis, the authors deal with sensitive elastic parameters for EEI inversion and effective scale for interpretation of lithology and fluid and, according to deterministic extended elastic impedance inversion, determine the variation and range and complete the pre-stack stochastic extended elastic impedance inversion, thus meeting the requirements of thin reservoir prediction. At last, the inversion results are interpreted crossly and the distribution of gas sand is predicted accurately, with the drilling data matching rate reaching over 90%.

Key words: tight sandstone; thin gas reservoir prediction; extended elastic impedance inversion; shear wave prediction

作者简介: 时磊(1981-),女,硕士,工程师,中国地质大学硕士学位,现从事地震资料综合解释工作。