

天然气地球物理勘探

叠前地震反演在苏里格气田储层识别和含气性检测中的应用

李凌高^{1,2}, 甘利灯², 杜文辉², 戴晓峰²

(1. 中国地质大学地球物理与信息技术学院, 北京 100083;

2. 中国石油勘探开发研究院物探技术所, 北京 100083)

摘要:介绍了叠前地震反演技术在苏里格气田有效储层识别和含气性检测中的应用。通过岩石物理分析建立了弹性参数与储层参数之间的联系,指出了工区内岩性、物性和流体的最敏感弹性参数。通过叠前地震反演获取了各种弹性参数反演结果,并根据岩石物理分析的结论将叠前地震反演结果进行综合解释,从密度和速度比交会图获得了岩性剖面,对识别出的砂岩根据反演的纵波阻抗计算了孔隙度剖面,对孔隙度大于5%的砂岩,利用笔者提出的新方法得到了含水饱和度剖面,在此基础上获得了孔隙度含气饱和度乘积剖面。

关键词:叠前地震反演;弹性参数;岩石物理分析;含气性检测

中图分类号: TE132.1⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1926(2008)02-0261-05

0 引言

叠前地震反演是勘探地球物理领域正在兴起的一项新技术,其在一些国家已经逐渐替代常规叠后反演成为油气储层预测中不可缺少的技术。近年来,叠前地震反演在国内也日益受到重视,在理论和方法上均取得了喜人的成果,在实际应用中,各油田也先后开展了先导性试验。本文将展示一个应用叠前反演技术在苏里格气田低孔低渗储层中进行有效储层识别和含气性检测的实例。

苏里格气田位于鄂尔多斯盆地西北侧的苏里格庙地区,是一个世界级大气田。目前的资料表明,苏里格气田有低孔、低渗、低丰度、低饱和度、低压等特点。其有效储层厚度变化大,连续性差,非均质性严重,地震储层预测难度大。主要表现为不同类型储层在波阻抗上存在很大重叠区间,利用波阻抗不能有效地将储层与非储层区分开来,传统的波阻抗反演结果得到的波阻抗资料无法有效地识别储层,也无法识别气层。叠前地震反演能获得大量的信息,在解决此类地质问题时具有巨大优势,因而开展叠

前地震储层预测工作十分必要。

1 岩石物理敏感因子分析

岩石物理敏感因子分析的任务是要寻找各种弹性参数与储层特性(岩性、物性、含油气性)之间的关系,它是弹性特征和储层特性的桥梁和纽带,是叠前地震研究中不可或缺的关键环节(图1)。



图1 岩石物理分析的总体流程

储层特征分析表明,苏里格庙地区自然伽玛能够

很好地区分岩性: 泥岩的自然伽玛值一般大于 120 API; 粉砂岩的自然伽玛值介于 100 ~ 120 API 之间; 中砂岩和细砂岩的自然伽玛值都小于 100 API。

为了用叠前反演的方法来对储层进行描述, 岩石物理分析是必不可少的步骤。我们按图 1 所示的流程建立叠前地震信息与地下岩层的岩性、物性和含油气性的关系。整个流程是一个去粗取精, “低中找高”的过程。

采用综合法^[1]对工区内没有横波资料及资料不满足要求的井估算了横波速度, 为后续的岩石物理分析及叠前反演工作提供了可靠的横波速度资料。

在敏感因子分析之前计算了大量的弹性参数, 首先对下文将提及的弹性参数说明如下: V_p 为纵波速度, V_s 为横波速度, ρ 为密度, λ 为第一拉梅系数, V_p/V_s 为纵横波速度比, V_p/I_s 为纵横波速度比与密度的比值, EI_{20° 为 20° 角对应的纵波弹性阻抗, SEI_{-20° 为 -20° 角对应的 PS 波弹性阻抗。

1.1 岩性敏感因子分析

(1) 优选出的最佳弹性参数组合是 (ρ, SEI_{-20°) 和 $(\rho, V_p/V_s)$ 。图 2 所示的是利用纵横波速度比与密度的交会图, 图中散点的颜色表示不同的岩性。可以看出: 煤的典型特点是密度较低 (小于 2.3 g/cm^3); 而砂泥岩的密度较高, 大于 2.3 g/cm^3 且速度比小于 1.7 的散点对应砂岩的弹性参数特征, 而密度大于 2.3 g/cm^3 且速度比大于 1.7 的散点则对应

泥岩的响应特征。

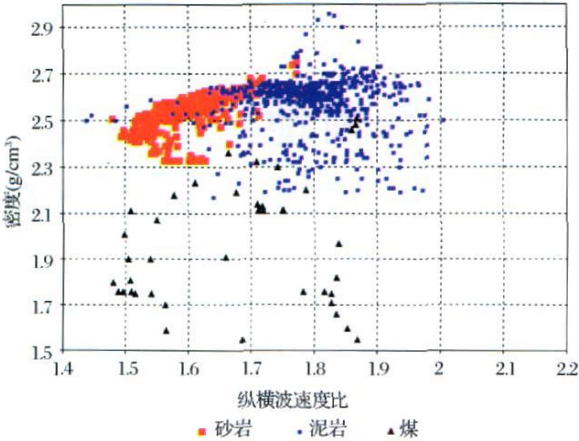
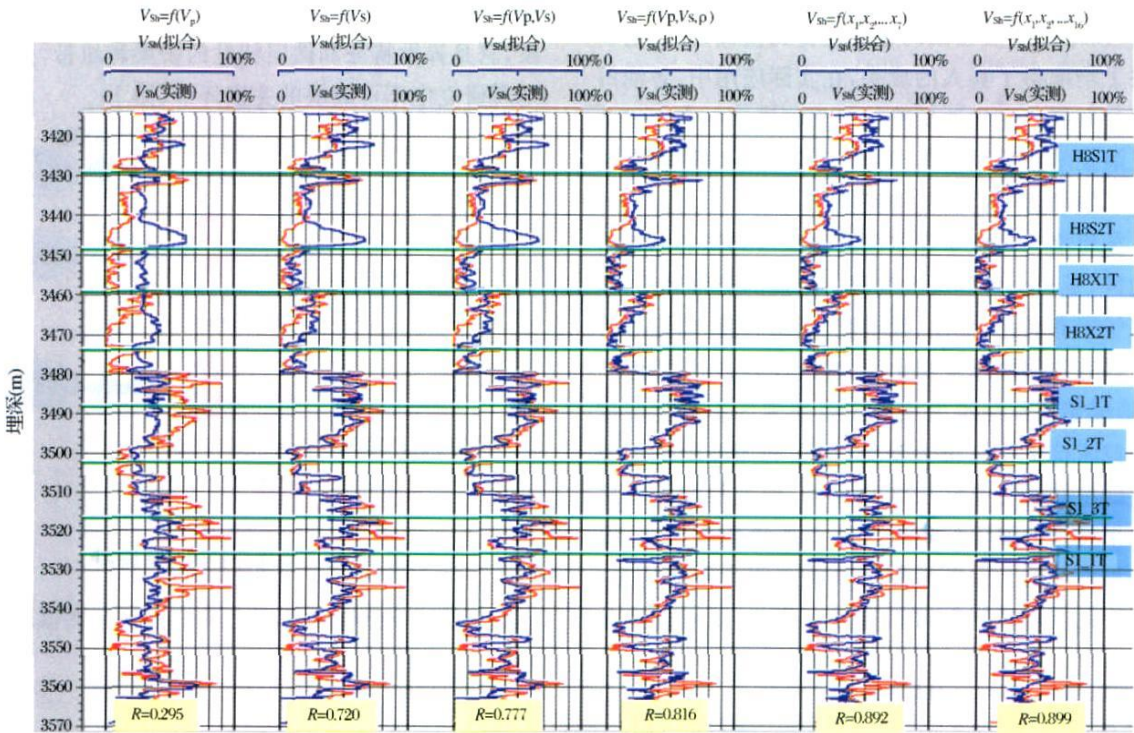


图 2 密度—纵横波速度比交会特征

(2)图 3 中给出了各种弹性参数组合方案对泥质含量的拟合效果, 图中红色曲线是实际的泥质含量曲线, 蓝色曲线是用不同的参数组合拟合得到的泥质含量曲线, 黄色矩形中标出了各种参数组合拟合泥质含量曲线时的相关系数。可以看出 3 个弹性参数 (V_p, V_s, ρ) 能对泥质含量较好的拟合 (相关系数 0.816); 7 个弹性参数 ($V_p, V_s, \rho, \lambda, V_p/V_s, V_p/I_s, EI_{20^\circ}$) 能对泥质含量很好拟合 (相关系数 0.892), 相关系数随着弹性参数的个数增加而逐渐增加, 但是当弹性参数个数从 7 个增加到 16 个时, 相关系数值增加很小 (只增加了 0.007), 说明更多弹性参数的



组合对拟合效果改善并不明显。

在精细岩性划分的基础上,分析砂岩中的物性

和流体敏感因子,认为纵波阻抗可以较好地预测孔隙度(图4)。

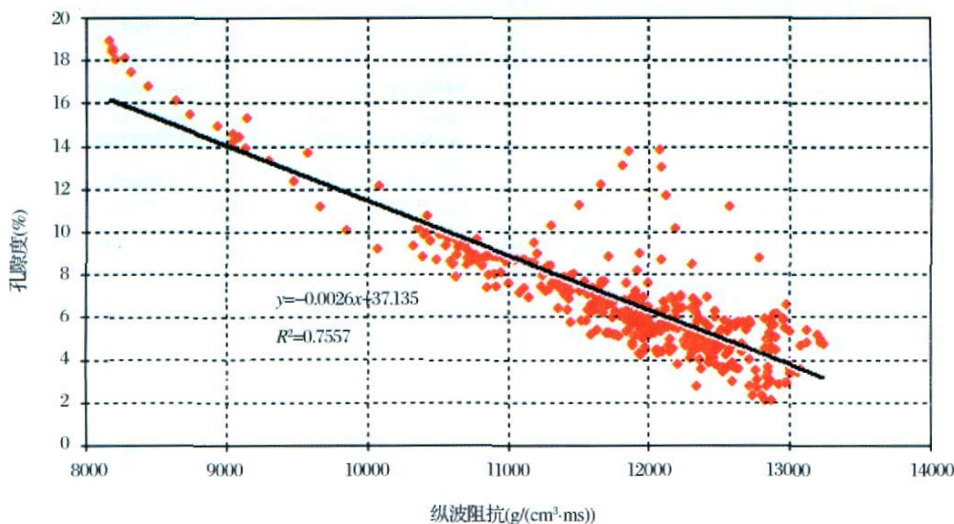


图4 砂岩孔隙度—纵波阻抗交会特征

1.2 用弹性参数定量预测含水饱和度

在孔隙度大于5%的砂岩中进行流体敏感因子分析,按以下3个步骤达到用弹性参数定量预测含水饱和度的目的:

(1)用 Gassmann 方程计算干燥岩石体积模量(K_d)和饱和流体的孔隙度体积模量(K_p):干燥岩石体积模量(K_d)是只与岩性和孔隙有关而与孔隙流体无关的项,饱和流的孔隙度体积模量(K_p)是对流体敏感的项。饱和流体岩石的体积模量(K)与干燥岩石体积模量(K_d)及饱和流体的孔隙度体积模量(K_p)之间具有如下关系:

$$K = K_d + K_p \quad (1)$$

式中: $K_p = \alpha^2 [(\alpha - \phi)/K_m + \phi/K_f]^{-1}$, 称为孔隙体积模量(pore space modulus); $\alpha = 1 - K_d/K_m$, 称为 Biot 系数, K_m 为岩石基质的体积模量, ϕ 为孔隙度, K_f 为流体的体积模量。

(2)经验公式拟合: ①拟合干燥岩石体积模量: $K_d = 30.257 + 172V_{sh} - 101.367\phi$, $R = 0.800$ (2) 式中 V_{sh} 和 ϕ 分别为泥质体积分数和孔隙度体积分数,两者均可按上文提及的方法从弹性参数定量拟合得到; ②拟合 K_p 与 S_w 的关系: 在 I 类砂岩中:

$$S_w = 20.42K_p + 18.26, R = 0.93 \quad (3)$$

在 II 类砂岩中:

$$S_w = 14.11K_p + 32.95, R = 0.80 \quad (4)$$

(3)根据方程(1)至(4)可以从弹性参数拟合含水饱和度,拟合效果如图5所示。从图5中可以看出,通过这种方法实现了对含水饱和度较好拟合,即

预测和实测含水饱和度曲线变化趋势一致,具有很好的对应性;预测和实测含水饱和度曲线在数值相当接近,除图的顶部少部分样点预测误差较大外,2条曲线几乎重合,拟合的相关系数达0.81。

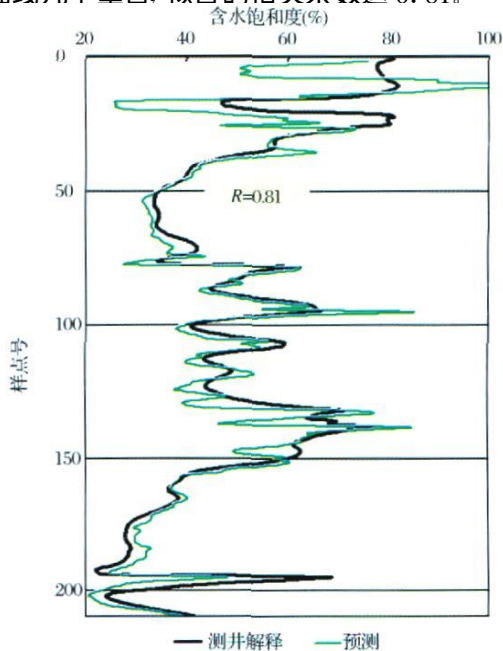


图5 预测与测井解释的含水饱和度比较

2 叠前地震反演

在叠前反演之前对地震道集进行了超道集处理,进一步压制了随机噪声,提高了信噪比,使地震资料品质进一步得到改善,如图6所示。

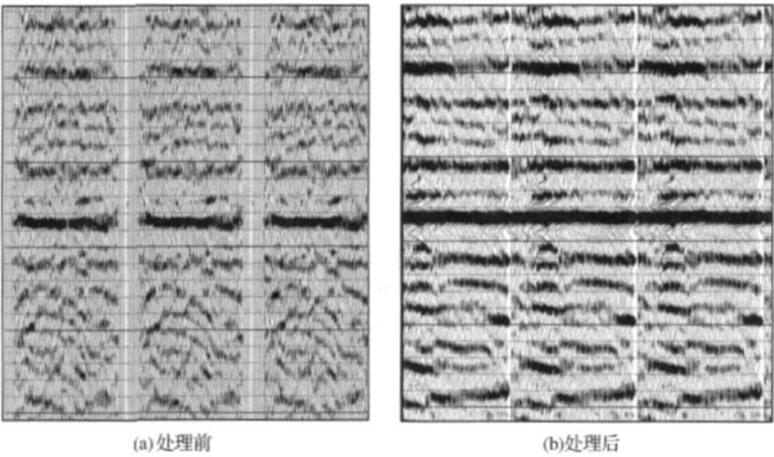


图6 超道集处理前后叠前资料品质比较

应用 LMR 反演(该方法由 Goodway 1997 年提出,其作法是在求得纵横波阻抗体后,计算得到 λ_p 和 μ_p 数据体用于岩性和流体识别。该方法的优点是易于实现,且用于岩性和流体描述时比纵波阻抗和横波阻抗更直观),弹性阻抗反演以及多角度弹性阻抗 3 种弹性阻抗反演方法获取了 V_p , V_s , ρ , EI_{20° 等 4 个弹性参数的反演结果,并根据纵、横波速度和密度计算了 λ , V_p/V_s , V_p/T_s 等弹性参数的数据体。

3 反演结果解释

在获取了多个弹性参数的反演结果之后,如何将获取的多个弹性参数有机结合起来进行储层岩

性、物性和流体进行描述是叠前地震描述的一个重要环节,也是叠前地震反演的最终落脚点,此过程称为多参数融合(Multiple Parameter Integration)过程,多参数融合时可以岩石物理分析的结论为指导。

根据岩石物理分析结论按如下步骤将叠前反演得到的弹性参数结合起来对储层进行综合解释:

(1)提取了拟自然伽玛剖面 and 泥质含量剖面,二者均可用于储层岩性预测。

(2)通过拟自然伽玛剖面的取值范围对地层岩性进行了识别得到了岩性剖面,并能与测井解释成果很好吻合(图 7),该剖面能更直观地反映砂岩的展布特征。

(3)在砂岩中,从纵波阻抗转换得到了孔隙度剖

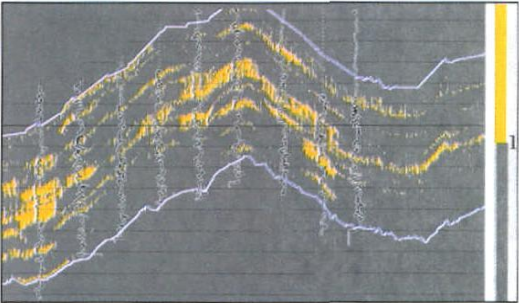


图7 根据自然伽玛确定的岩性(黄色表示砂岩)

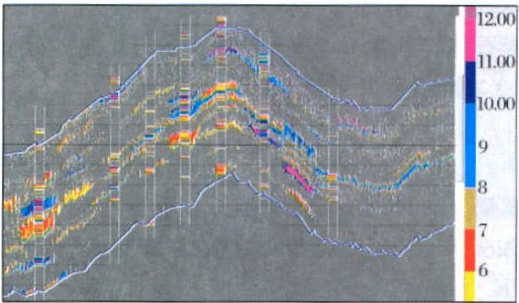


图8 孔隙度剖面(砂岩部分)

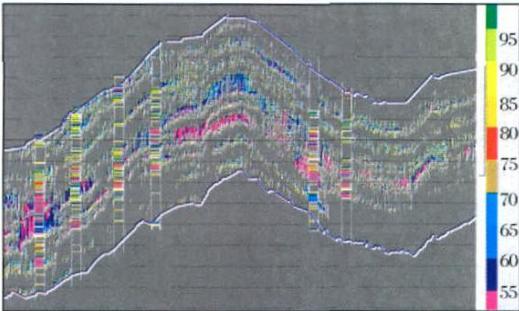


图9 反演得到的含水饱和度剖面

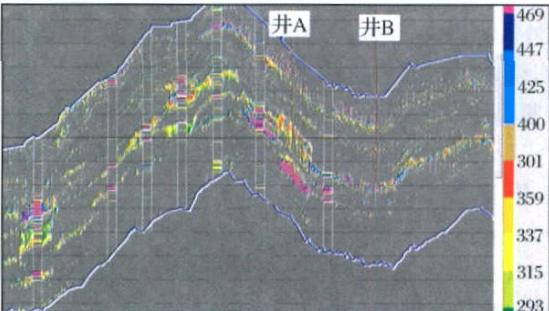


图10 含气饱和度与孔隙度的乘积剖面

面(图8),能与测井解释孔隙度大小很好地拟合,对砂岩的孔隙度大小进行了定量描述。

(4)在获取泥质含量、孔隙度等剖面后按上文提及的方法从多个弹性参数的反演结果计算了含水饱和度剖面(图9),含水饱和度定量地描述了地下储层的含气性情况。

(5)为了更好地预测天然气的分布,依据含水饱和度和孔隙度剖面计算了含气饱和度和孔隙度的乘积剖面,该剖面可以用来对气层的产能进行预测。图10是含气饱和度与孔隙度乘积剖面。该剖面显示井A和井B处是高产气层,后经钻井和试气证实井A试气日产15万 m^3 ,井B虽未试气,但测井解释为优质产层,说明预测了预测的有效性。

4 结论

通过岩石物理分析可建立弹性参数与储层参数之间的联系,指明工区内岩性、物性和含气性定性识别和定量预测的方法。通过叠前地震反演可获取各种弹性参数反演结果,根据岩石物理分析的结论对叠前反演的结果进行解释,可获得岩性剖面、孔隙度剖面、含水饱和度剖面以及孔隙度和含气饱和度乘积剖面。依据后者可对工区内的有效储层分布、孔隙度大小及高产气层的分布情况进行预测。预测结

果得到了钻井的证实。

参考文献:

- [1] 李凌高,姚逢昌,甘利灯. Gassmann 方程及其应用[J]. 石油地球物理勘探: 东部会议专刊, 2004: 129-131.
- [2] 甘利灯,赵邦六,杜文辉,等. 弹性阻抗反演及其在岩性和流体预测中的潜力分析[J]. 石油物探, 2005 44(5): 504-508.
- [3] 杨占龙,郭精义,陈启林,等. 地震信息多参数综合分析 with 岩性油气藏勘探——以 JH 盆地 XN 地区为例[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(6): 628-632.
- [4] 李在光,杨占龙,刘俊田,等. 多属性综合方法预测含油气性及其效果[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(5): 727-730.
- [5] Ken Hedin. Pore space modulus and extracting using AVO [R]. SEG annual meeting, 2000.
- [6] De-hua Han, Michael L. Batzle. Gassmann's equation and fluid-saturation effect on seismic velocities [J]. Geophysics, 2004, 69(2): 398-405.
- [7] Russell R H, Hedin R, Hilterman F J. *et al.* Fluid-property discrimination with AVO: a Biot-Gassmann perspective [J]. Geophysics, 2003, 68(1): 29-39.
- [8] David Gray. Elastic Inversion for Lamé Parameters. 72nd Annual International Meeting [C]. SEG. Expanded Abstract, 2002: 197-200.
- [9] Connolly P. Elastic impedance [J]. The Leading Edge, 1999, 18: 438-452.
- [10] Whitecombe D N. Elastic impedance normalization [J]. Geophysics, 2002, 67(1): 60-62.

Pre-stack Seismic Inversion Applied to Reservoir Prediction and Natural Gas Detection in SLG Gas Field

LI Ling-gao^{1, 2}, GAN Li-deng², DU Wen-hui², DAI Xiao-feng²

(1. Geophysics and Information Technology School, China University of Geosciences, Beijing 100083, China.

2. Geophysical Technology Department, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper presents an application of prestack seismic inversion technology to reservoir prediction and gas detection. By rock physical analysis, the relation between elastic parameters and reservoir properties is constructed. By pre-stack inversion, a number of various elastic parameters are obtained. The joint interpretation of these inverted parameters are then carried out in the guidance of the conclusions drawn from the rock physical analysis; lithology sections are obtained by cross-plotting density and V_p/V_s sections; porosity sections are transformed from P-impedance sections for the predicted sands, water saturation sections are obtained from several elastic inversions using the new method given in this paper; the product of porosity and water saturation are then derived.

Key words: Pre-stack seismic inversion; Elastic parameters; Rock physical analysis; Gas detection.