

# 利用叠前地震数据预测裂缝储层的应用研究

黄伟传, 杨长春, 王彦飞

(中国科学院地质与地球物理所, 北京 100029)

**摘要** 叠前地震资料储层预测技术是在 Zoeppritz 方程基础上发展起来的, 通过处理地震数据随着不同入射角地震反射属性, 得到地震属性随着入射角变化而改变, 研究分析得到反映岩性变化的纵波速度、横波速度、泊松比和截距与梯度剖面, 预测裂缝储层的发育及分布. 同时根据不同方位角地震资料属性, 计算得到不同方位角目的层的属性差异, 使用各向异性椭圆公式作拟合, 求出背景趋势  $A$  和各向异性因子  $B$ , 利用最大振幅包络方位和对应  $\theta$ , 求出裂缝发育优势方向, 及  $B/A$  各向异性因子, 实现对裂缝储层预测.

**关键词** 叠前反演, 各向异性, 裂缝储层, 方位角

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2007)05-1602-05

## The application of pre-stack seismic data in predicting the fractured reservoir

HUANG Wei-chuan, YANG Chang-chun

(Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract** Development of the Pre-seismic reservoir prediction is based on the function of Zoeppritz. By processing the different seismic attribution of different incidence angle and the analysis of the change of the attribute with incidence angle. Deriving  $P$ -wave velocity  $S$ -wave velocity Poisson ratio intercept and gradient profiles which indicate the distribution of fractured reservoir. We can also get the seismic attribute of different azimuth angle, and the different seismic attribute, fitting them by ellipse, draw background trend  $A$  and the anisotropic coefficient  $B$ , get the direction of the fractures by the max amplitude azimuth, and the anisotropic coefficient  $B/A$ , estimate the fractured reservoir.

**Keywords** Pre-stack inversion, anisotropic, fractured reservoir, Azimuth

### 0 引言

目前在全世界范围进行的油气勘探开发过程中, 裂缝性油气藏所占的比例越来越大. 但是裂缝储层的描述一直是比较困难的课题, 主要是由于裂缝的形成受多种因素控制, 其物理属性复杂, 横向、纵向变化大, 表现出很强的各向异性. 而且裂缝在不同岩性地层中存在, 在砂岩、泥质岩和碳酸岩甚至火成岩中均存在裂缝性储集层, 使得裂缝性油气藏比常规油气藏更难于描述. 横波方法主要在过去的十年发展起来, 通过横波走时差异和垂直入射反射振幅来得到  $\delta$  (Mueller, Geophys. J. int. 1991). 然而,

这项技术由于多分量勘探的费用和难以得到高质量的横波数据用来做分析. 范国璋等(2002)<sup>[1]</sup> 计算了裂缝模型的反射系数随着地震入射角和方位角的变化, 建立起了反射系数特征与裂缝分布的关系. 通过分析得到, 在高倾角时平行于裂缝的方向的含气裂缝储层的 AVO 响应随着入射角的增加而增大; 垂直于裂缝方向 AVO 响应却相应降低了; 而储层含水时 AVO 特性不明显. 从三维纵波数据体中得到更多的裂缝油气藏信息是非常有用的, 入射角和方位角变化引起的振幅变化是非常适合裂缝储层研究, 同时为裂缝储层研究提供了非常可靠实用的工具.

收稿日期 2007-01-10; 修回日期 2007-03-20.

基金项目 国家 973 项目(2005CB422104)资助.

作者简介 黄伟传, 男, 1969 年生, 高级工程师, 目前在中国科学院地质与地球物理研究所从事油储地球物理方面研究工作.  
(E-mail: sucun2003@163.com).

### 1 角道集数据体预测裂缝储层

角道集地震数据是在地震资料处理中,根据地震数据入射角不同而得到的不同入射角地震数据(简称 AVA 道集).经典的 Zoeppritz 方程给出了纵横波入射的复杂情况下,单一反射界面的反射波和透射波能量公式.为了详细研究各向异性介质的反射系数,在不同的假设条件下得到了一些的简化公式.非常经典的是 Shuey(1985)<sup>[4]</sup>,在假设地层的属性 ( $\Delta\rho/\rho, \Delta v_p/v_p, \Delta v_s/v_s \ll 1$ ) 改变很小的情况下,不考虑方位角影响,将 Zoeppritz 方程简化为的近似形式:

$$R_p(\theta) \approx R_0 + \left( A_0 R_0 + \frac{\Delta\sigma}{(1-\sigma)^2} \right) \sin^2\theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p} (\tan^2\theta - \sin^2\theta), \quad (1)$$

推导出在地层界面处,密度  $\rho$ 、P 波速度  $v_p$  和 S 波速度  $v_s$  简化参数化的近似形式. Connolly(1999) 对传统 AVO 分析方法进行了分析,提出了一种弹性波阻抗反演方法. Connolly 定义的弹性波阻抗的公式:

$$EI = V_p^{(1+\tan^2\theta)} V_s^{(-8K\sin^2\theta)} \rho^{(1-4K\sin^2\theta)}, \quad (2)$$

式中  $V_p$ 、 $V_s$  和  $\rho$  分别表示纵波速度、横波速度和密度.对于不同的角道集数据体,通过联合反演,得到不同角道集反演弹性波阻抗数据体,通过联合处理得到反映储层物性或岩性的参数数据体,不但与地

层的波阻抗有关,还与岩石的弹性参数(泊松比)有关.

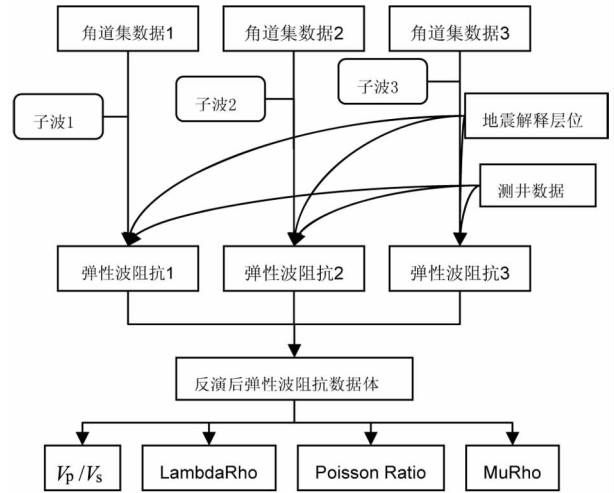


图 1 叠前反演处理流程

Fig. 1 The workflow of pre-stack inversion

图 2 为对 K4 地区二维测线进行了 AVO 处理,这里对过 GC1 井的 TZ03-616NE 线的 AVO 结果进行分析.从角道集部分叠加剖面上分析含气层段中远偏移距之间(15°、25°之间)有 AVO 异常现象,振幅随偏移距的增加有增大的趋势.由于目的层埋藏较深,目的层速度很大,所以近中偏移距之间(5°、15°之间)AVO 现象不明显,呈现正常的振幅随偏移距增加而减小的趋势.

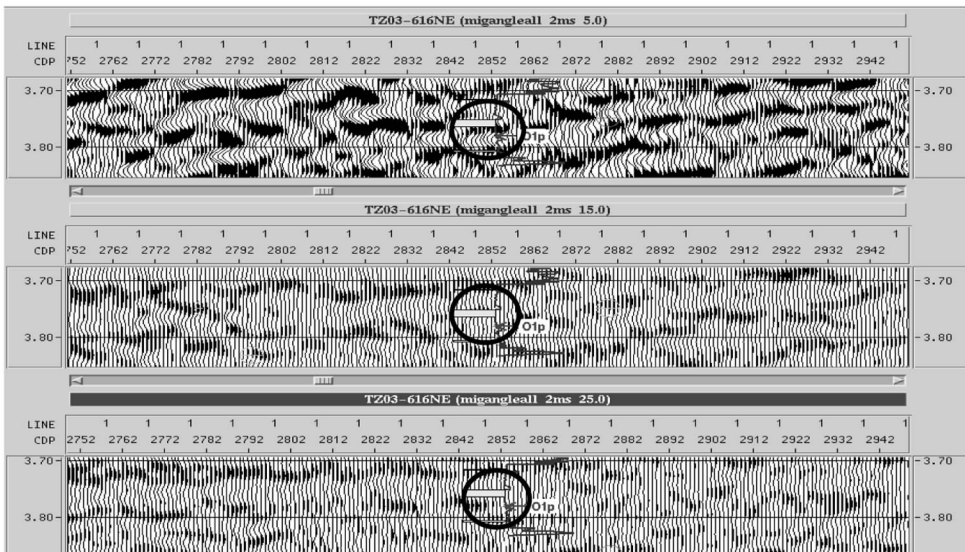


图 2 过 GC1 井的不同角道集剖面(5°、15°、25°)

Fig. 2 The angles profiles passing the well GC1(5°, 15°, 25°)

对地震角道集数据进行反演即可获得不同角度的弹性波阻抗,利用叠前反演技术,对地震资料进行处理,得到不同角道集对于 AVO 属性剖面来说,在梯度剖面上气层呈负的大值异常,在截距剖面组气层呈正的大值异常.联合 A、B 剖面作了  $A * B$  剖面,在  $A * B$  剖面上气层呈负的大值异常.从 AVO 属性剖面分析,目的层有一定的 AVO 异常现象,目的层以下地层组 AVO 现象也比较突出,裂缝发育比较集中,缝、洞造成了介质很强的各向异性,各向异性的存在也会导致 AVO 现象.

## 2 方位角数据体预测裂缝储层

从不同的方位角研究地层地震响应的影响,为了用同样的方法理解裂缝油藏的反射系数,Stuart Crampin, Leon Thomsen 和其他人(参考下列的文章),初始考虑一阶方位角各项异性模型剪切波的双折射试验.假设平行垂直裂缝各向同性矩阵,得到水平轴对称横向各项同性模型草图(图 3).就像箭头所指示的那样方位角对各向异性的横波的影响是一

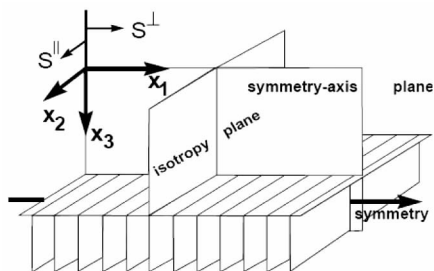


图 3 HTI 模型图, P 波反射振幅在两个对称平面上的差异和由于方位角引起 AVO 响应的差异.(引用 Thomsen)

Fig. 3 Sketch of an HTI model. Different P-wave reflection amplitudes in the two vertical symmetry planes and lead to azimuthally-dependent AVO response

阶的,并且分裂成两个分量具有不同的传播速度<sup>[2]</sup>.在垂直如射角时分裂的横波速度成分的差异,(Thomsen 系数  $\gamma$ )与裂缝的密度密切相关,是反映裂缝渗透率的重要参数.裂缝储层与地震的方位角密切相关,对于固定炮检距,P 波反射振幅包络  $R$  与裂缝方向夹角  $\theta$  之间有如下关系:

$$R(\theta) = A + B\cos 2\theta. \quad (3)$$

式中,  $A$  为与炮检距有关的背景趋势,  $B$  为各向异性因子,  $\theta$  代表炮检距方向与裂缝发育方向的夹角.其中,  $A$  参数相当于消除了裂缝影响的反射振幅强

度,反映了岩性变化引起的振幅变化;  $B$  参数相当于反射振幅随炮检距方位改变的影响,其大小决定了储层裂缝的发育程度.对于均匀各向同性介质,  $A$  就是均匀介质下的反射振幅,它仅在炮检距方向变化.当  $B$  值大,  $A$  值小时,裂缝发育好.当  $B$  值小,  $A$  值大时,裂缝不发育.因此可把  $B/A$  作为复杂条件下储层裂缝发育程度的度量.

在三维地震资料保真、保幅和地表一致性处理的基础上,进行地震资料的叠前处理:

(1) 扩大面元,尽可能使各个面元的覆盖次数和炮检距均匀分布,使叠加剖面有较高的信噪比<sup>[5]</sup>.各个方位角的叠加剖面信噪比有明显提高、振幅的均匀性也有所改善.

(2) 将不同方位角最终的振幅包络数据按不同方位角方位角道集.

(3) 对于每组道集进行精确速度分析和高精度动校正,分别叠加得到不同方位角地震数据.

(4) 对目的层,使用公式做椭圆拟合,求出背景趋势  $A$  和各向异性因子  $B$ ; 利用最大振幅包络方位和对应  $\theta$ , 求出裂缝发育优势方向; 利用  $B/A$  求解相对各向异性因子, 对应裂缝发育的相对密度和幅度<sup>[1]</sup>.

对于三维宽方位角采集的地震资料,地震的覆盖次数要足够高,炮检距-方位分布比较均匀,在给定的 CDP 位置,只要有多于 3 个方位角的地震观测数据,就可以得到一个确定的解,从而根据公式(3)确定裂缝发育优势方向,裂缝的相对密度和幅度.对于超定方程的解,用下式(4)对 CMP 振幅包络的方位角道集做最小平方误差拟合,使目标函数  $F$  最小化.

$$F = \sum_{i=1}^n (A + B\cos 2(\alpha_i - \phi) - R_i)^2. \quad (4)$$

得到  $A$ 、 $B$ 、 $\phi$  及  $B/A$ ,  $\phi$  是裂缝方位角,  $B/A$  是对应裂缝方位角裂缝发育的相对似然性指示,或称为裂缝的相对密度和幅度.

根据工区的实际情况,在本次处理中通过扩大面元、精细速度、保振幅处理,得到方位角数据体.分析选择的参考方位角:  $10^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $110^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $165^\circ$  入射方位角,抽取的数据体,在目的层段提取振幅包络值,通过 6 个不同方位角入射振幅包络差值可初步预测裂缝的方位.首先,利用  $10^\circ$  方位角的数据体分别与  $50^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $110^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $165^\circ$  入射方位角的数据体振幅包络差值分析,在各个方位角振幅差值的平面图上表现的振幅差异值的幅度也不相同,  $10^\circ \sim$



- 应用[J]. 石油物探, 2004, 43(4): 373~376.
- [8] 戈革. 地震波动力学基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1980, 217~234.
- [9] 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 东营: 石油大学出版社, 1993, 275~291.
- [10] 陈雨红, 杨长春, 曹齐放, 等. 几种时频分析方法比较[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(4): 1180~1185.
- [11] Castagna J P. Shear-wave time-average equation for sandstones: presented at 55th Annual SEG Meeting, 1985, 10(2): 447~449.
- [12] 宋海斌, Matsubayashi Osamu, 杨胜雄, 等. 含天然气水合物沉积物的岩石物性模型与似海底反射层的 AVA 特征[J]. 地球物理学报, 2002, 45(4): 546~556.
- [13] 牛滨华, 文鹏, 飞温宁, 等. 基于 BSR 的 AVO 正演估算水合物含量方法的研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 143~152.
- [14] 殷八斤, 曾灏, 杨在岩. AVO 技术的理论与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995, 58~67.

请查阅本刊网站了解以下详细内容  
(<http://www.progeophys.cn>)

### 本刊 2008 年征订启事

2008 年《地球物理学进展》为双月刊, 每年 6 期, 每期定价 35 元, 全年定价为 210 元。

订刊联系方式

(1) 本刊编辑部(邮局汇款与单位电汇均可)

汇款地址 100029 北京市 9825 信箱《地球物理学进展》编辑部

电话传真 010-82998113, 010-82998105, 010-62369620

联系人 刘少华, 肖台琴, 赵 雷

电子邮件 shliu@cgs.org.cn, geophys@163.com

网 站 <http://www.progeophys.cn>

开户行 中国农业银行北京建德支行 账 号 190901040000456

收款单位 中国科学院地质与地球物理研究所

(务必在注释行写上: 购《地球物理学进展》款, 同时写上您的姓名和联系地址)

(2) 天津全国非邮发联合证订服务部

邮编地址 300385 天津市大寺泉集北里别墅 17 号

电话传真 022-23973378, 022-23962479

网 址 <http://www.LHZD.com>

E - mail LHZD@public.tpt.tj.cn