

· 综合研究 ·

利用 Walkaway VSP 和全方位地面地震数据求取各向异性参数

孙祥娥*^{①②} 高军^③ 凌云^③ 孙德胜^③ 林吉祥^③

(^①长江大学电信学院,湖北荆州 434023;^②东方地球物理公司博士后工作站,河北涿州 072751;

^③东方地球物理公司油藏地球物理研究中心,河北涿州 072751)

孙祥娥,高军,凌云,孙德胜,林吉祥. 利用 Walkaway VSP 和全方位地面地震数据求取各向异性参数. 石油地球物理勘探, 2010, 45(增刊 1): 172~175

摘要 本文利用 8 方向 WVSP 和全方位地面地震数据研究松辽盆地北部的深部火成岩 VTI 和方位 HTI 特性, 求解介质的各向异性参数, 分析方位 HTI 介质的特点。认为在 VTI 假设基础上, 根据 8 方向 WVSP 获得的方位 HTI 介质相对参数能够很好地描述介质的横向各向异性, 通过与地面地震数据的对比研究发现, 这种方位 HTI 介质相对参数也能够作为描述介质裂缝方向和强度的一种手段。

关键词 WVSP 全方位地面地震 VTI HTI 各向异性参数

1 引言

各向异性介质理论的研究和应用已成为现今地球物理领域的热点之一。Thomsen^[1]和 Banik^[2]对弱各向异性的研究, 促进了各向异性理论在实际地震勘探中的应用; Tsvankin 等^[3,4]关于各向异性介质反射波时距曲线方程的研究以及 Schoenberg 等^[5,6]对裂缝参数估计的研究进一步加速了各向异性理论在生产实际中的应用。在各种各向异性介质中, VTI 介质可用于描述水平薄互储层, HTI 介质可用于描述垂直裂缝带储层, 因此 VTI 介质和 HTI 介质成为人们关注的焦点。本文将利用实际的 Walkaway VSP(简称 WVSP)和全方位地面地震数据, 联合研究目标区的各向异性特征, 求解各向异性参数, 并讨论各向异性对地下裂缝的影响。

2 研究区地质背景和地震观测参数简介

研究区位于松辽盆地北部, 3200m 以上地层相对平缓、速度场空间变化较小、断裂或裂缝不太发育, 裂缝方向也较单一, 3200~3900m 为火成岩地

层, 内部断裂和裂缝十分复杂, 并且具有多次喷发的复杂相带关系。可见 3200m 以上地层具有 VTI 介质特征和单一方向断裂引起的 HTI 介质特征, 3200m 以下火成岩地层的 VTI 和 HTI 介质特征则更加复杂。

本次研究是在零井源距 VSP(ZVSP, 检波器间距 10m、深度 200~3900m)数据基础上, 利用 8 方向 WVSP(检波器间距 20m, 深度 2640~3900m, 最大炮检距 4000m)和全方位地面地震数据(CMP 面元 25m×25m, 满覆盖面积 30km²)联合研究深部火成岩裂缝地层的 VTI 和 HTI 特征, 以便分析裂缝特征。

3 方法实现

3.1 各向同性假设

首先假设介质为水平层状的各向同性介质, 利用 ZVSP 数据得到的垂直反射时间 t_0 和速度 $V_{\text{NMO},i}$, 正演计算的各激发点至各级检波器的最小旅行时为 $t_{1,j}$, 即

$$t_{1,j} = \left[t_{0,i}^2 + \frac{x_{ij}^2}{V_{\text{NMO},i}^2} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中: i 为检波器级数, $i \in [1, M]$; j 表示炮点编号, j

* 湖北省荆州市长江大学电信学院, 434023

本文于 2009 年 4 月 12 日收到, 修改稿于 2010 年 10 月 13 日收到。

$\in [1, N]$; x_{ij} 为第 i 个炮点到第 j 级检波器的距离。分析 $t_{1,ij}$ 与 WVSP 数据初至时间 t_{ij} 的时差 $\Delta t_{1,ij}$ 可得

$$\Delta t_{1,ij} = t_{ij} - t_{1,ij} \quad (2)$$

图 1a、图 1c 中的蓝色散点图显示了 3160m 和 3640m 深度时 $\Delta t_{1,ij}$ 随井源距变化的情况。当井源距 4000m 时,浅层时差约 120ms,深层时差约 100ms。相同深度处的时差 $\Delta t_{1,ij}$ 随着井源距的增加而增加;相同井源距的时差 $\Delta t_{1,ij}$ 随着深度的增加而减小。

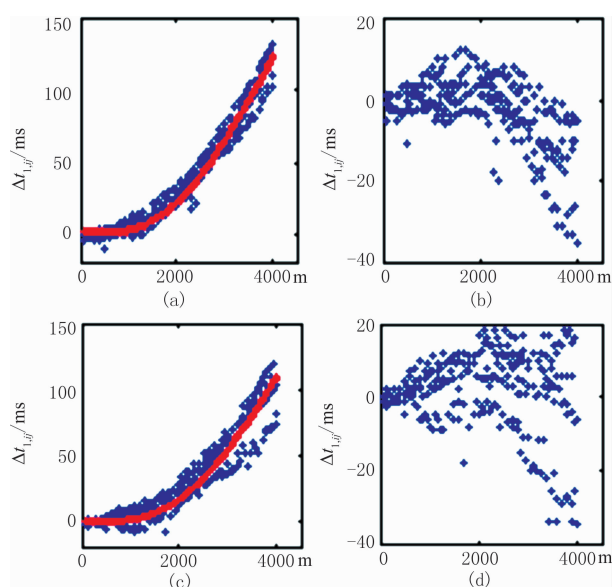


图 1 VTI 介质假设前后正演旅行时间与 WVSP 数据初至时差分析

(a) 深度 3160m, 修正前; (b) 深度 3160m, 修正后; (c) 深度 3640m, 修正前; (d) 深度 3640m, 修正后。图 (a)、(b) 中蓝色散点为 Δt 随井源距变化曲线, 红线为弱各向异性 VTI 介质拟合结果

3.2 VTI 介质假设

进一步假设地下介质为垂直横向各向同性 VTI 介质。根据 Alkhalifah 等^[4]提出的 TI 介质中地震波旅行时方程

$$t_{2,ij}^2 = t_{0,i}^2 + \frac{x_{ij}^2}{V_{\text{NMO},i}^2} - \frac{2\eta_i x_{ij}^4}{V_{\text{NMO},i}^2 [t_{0,i}^2 V_{\text{NMO},i}^2 + (1 + 2\eta_i) x_{ij}^2]} \quad (3)$$

可以得到弱各向异性时差偏离双曲线的修正量 Δt_η

$$\Delta t_{\eta,ij} = \left[t_{0,i}^2 + \frac{x_{ij}^2}{V_{\text{NMO},i}^2} \right]^{1/2} - \left[t_{0,i}^2 + \frac{x_{ij}^2}{V_{\text{NMO},i}^2} - \frac{2\eta_i x_{ij}^4}{V_{\text{NMO},i}^2 [t_{0,i}^2 V_{\text{NMO},i}^2 + (1 + 2\eta_i) x_{ij}^2]} \right]^{1/2} \quad (4)$$

就是说,时差 $\Delta t_{\eta,ij}$ 可以在最小平方误差拟合的原则下,求解使 ϵ_1 最小的 $\Delta t_{\eta,ij}$,进而获得 $\Delta t_{2,ij}$ 和各向异性参数 η_i ,即

$$\begin{cases} \epsilon_1 = \sum_{j=1}^N (\Delta t_{1,ij} - \Delta t_{\eta,ij})^2 \\ \Delta t_{2,ij} = \Delta t_{1,ij} - \Delta t_{\eta,ij} \end{cases} \quad (5)$$

图 1a、图 1c 中的红线是 3160m 和 3640m 深度点的弱各向异性 VTI 介质 ($\eta=0.27$ 、 $\eta=0.31$) 拟合结果,经过弱各向异性时差 $\Delta t_{\eta,ij}$ 修正后的时差 $\Delta t_{2,ij}$ 减小为 $-40 \sim 20$ ms,如图 1b、图 1d 所示。说明弱各向异性 VTI 介质假设相对于各向同性介质假设能够较好地描述研究区地层的特点。逐点计算每一深度点的时差 $\Delta t_{2,ij}$,可以得到不同深度点的弱各向异性参数。

图 2 分别用实线和虚线表示了利用 3D VSP 数据和 WVSP 数据求解的 VTI 介质参数随深度的变化关系。分析各向异性参数的特点可以看出,尽管 8 方向 WVSP 数据量远远小于 3D VSP 数据量,但最终计算的弱各向异性曲线仍具有较好连续性,说明根据多方向 WVSP 数据可以获得较好的弱各向异性参数。

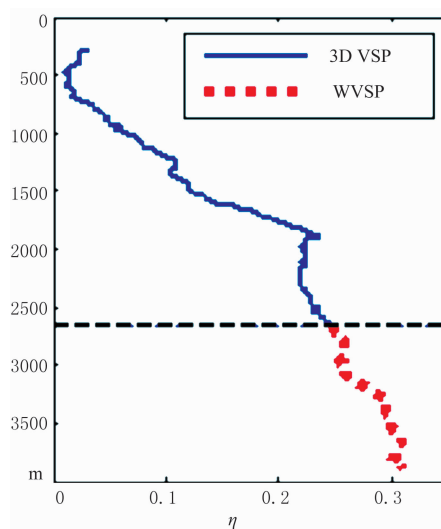


图 2 随深度变化的 VTI 各向异性参数

时差 $\Delta t_{1,ij}$ 和 $\Delta t_{2,ij}$ 在 3160m 和 3640m 深度的空间分布如图 3 所示。 $\Delta t_{1,ij}$ 在 8 方向上随井源距变化的现象在 $\Delta t_{2,ij}$ 中基本消失,但 3640m 处的 $\Delta t_{2,ij}$ 存在明显的东北方向时差大于西南方向,而 3160m 处这种现象并不十分明显,说明研究区中 3640m 附近非均匀速度影响和构造倾角影响较强。

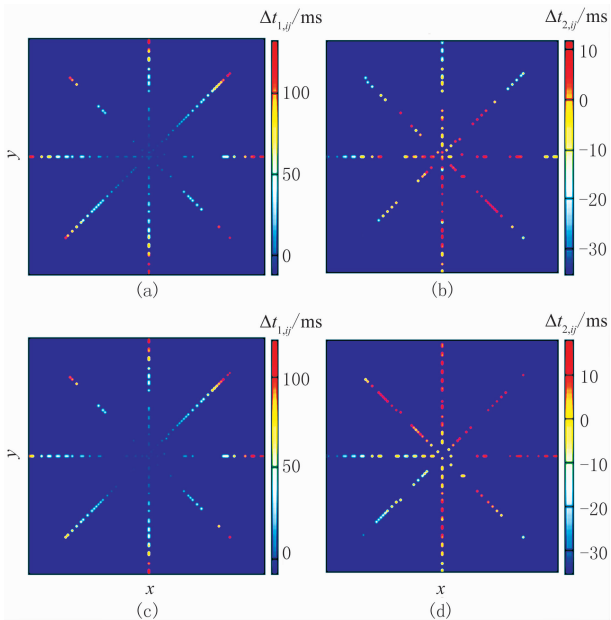


图3 不同深度时 VTI 假设前后正演旅行时与实际初至时差的空间分析

(a) 深度 3160m, 时差 $\Delta t_{1,ij}$; (b) 深度 3160m, 时差 $\Delta t_{2,ij}$;
(c) 深度 3640m, 时差 $\Delta t_{1,ij}$; (d) 深度 3640m, 时差 $\Delta t_{2,ij}$

3 方位角 VTI 介质假设

分析单方向的时差相对于 WVSP 数据时差在总体上的分布特点, 不论是 $\Delta t_{1,ij}$ 还是 $\Delta t_{2,ij}$, 在每一个检波器深度点处都具有明显的方向特性; 分析单方向的 $\Delta t_{1,ij}$ 与 WVSP 数据时差拟合曲线(图 1a、图 1c 中的红线)之间也存在明显的方向特性, 因此有必要采用方位角 VTI 介质假设条件进行相对 HTI 介质参数的求取。

利用 WVSP 的时差 $\Delta t_{1,ij}$ 在 d 方向上的数据 $\Delta t_{1,ij,d}$, 按照最小平方误差准则, 求解使 ϵ_2 最小的 $\Delta t_{\eta,ij,d}$, 进而获得 $\Delta t_{2,ij,d}$ 和单方向各向异性参数 $\eta_{i,d}$, 即

$$\begin{cases} \epsilon_2 = \sum_{j=1}^N (\Delta t_{1,ij,d} - \Delta t_{\eta,ij,d})^2 \\ \Delta t_{2,ij,d} = \Delta t_{1,ij,d} - \Delta t_{\eta,ij,d} \end{cases} \quad (6)$$

图 4 给出了深度 3640m 处用不同方向数据按照式(6)对 $\Delta t_{1,ij,d}$ 进行拟合的结果。图中黑线为 8 方向 WVSP 按照式(5)计算的时差 $\Delta t_{\eta,ij}$, 红线为单方向 WVSP 数据按照式(6)计算的时差 $\Delta t_{\eta,ij,d}$ 。由图可见, 在方位 VTI 介质假设条件下可以获得各个方向上较好的拟合结果, 因此 VTI+HTI 介质假设能更好地描述深部火成岩断裂和裂缝相对性质的变化。

逐点求取各深度点在不同方向上的各向异性参数, 可以得到图 5 所示的随深度变化的 VTI+HTI 介质的特性曲线。在火成岩顶部 3260m 以上地层的 VTI+HTI 介质曲线在 8 个方向上都是逐渐增大的, 具有相对单一的断裂或裂缝影响, 而在 3260m 以下地层的 VTI+HTI 介质曲线相对关系发生明显变化。从 3260m~3280m 时 VTI+HTI 介质曲线出现突变, 在西、西南、南和东南四个方向上各向异性参数突然变小(图 5a), 而且变化趋势转为逐渐变小。在东、东北、北以及西北四个方向, 参数急剧变大, 但仍然保持逐渐变大的趋势(图 5b)。这种各向异性参数变化趋势的改变, 说明进入火成岩后介质的横向各向异性发生急剧变化。

图 6a、图 6b 显示了 3160m 和 3640m 两个深度点 VTI+HTI 介质相对参数在平面上的矢量关系。两个深度处的矢量关系图变化较大, 在 3640m 处东北方向的各向异性明显比西南方向大一些, 这与图 3 所示的空间检测结果相同, 说明进入火成岩后 HTI 介质影响明显增大。

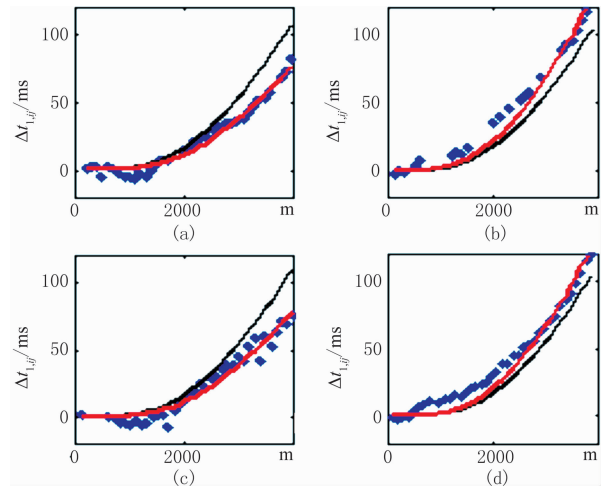


图4 深度 3640m 时单方向时差按照式(6)拟合时差分析
(a) 西, $\eta=0.205$; (b) 东, $\eta=0.405$; (c) 南西, $\eta=0.205$;
(d) 北东, $\eta=0.39$

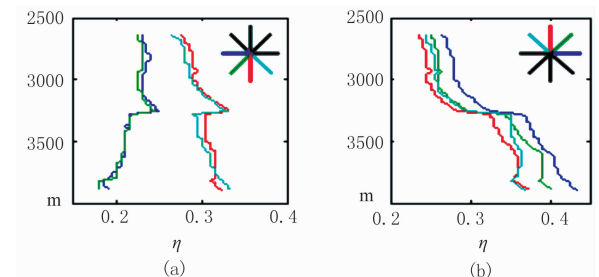


图5 单方向时差拟合的各向异性参数与深度关系

图 7 显示了两个深度处的相干地震属性切片, 3200m 处存在一组南北向相对单一的断裂或裂缝, 图 7a 中红箭头所示; 3600m 处除了有一组近南北向断裂或裂缝外(图 7b 中红箭头所示), 还存在由于火山活动引起近圆形的裂缝影响(图 7b 红色虚线箭头所示)。这进一步验证了在深部火成岩发育地层中存在更为复杂的断裂或裂缝影响。

图 8 显示了地面地震数据在过井部位的方位角道集数据。在深度 3160m 时 90° 方向和 270° 方向存在两个最小深度点, 0° 和 180° 为两个最大深度点, 说

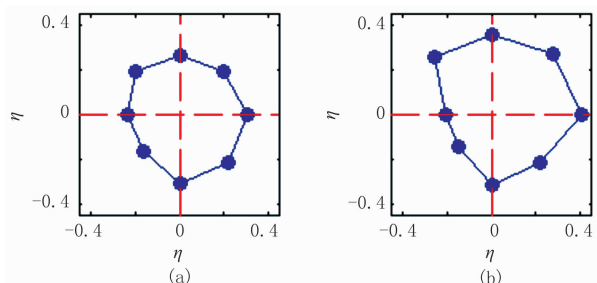


图 6 各向异性参数在两个深度处的矢量图
(a) 3160m; (b) 3640m

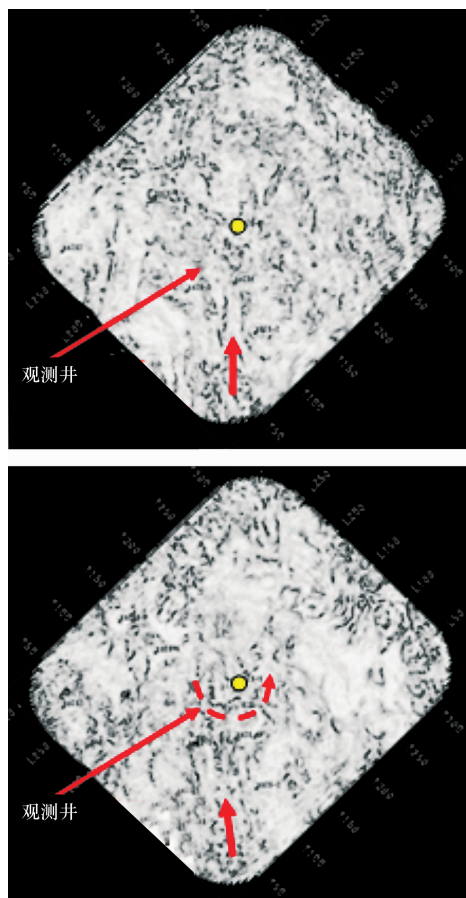


图 7 深度 3200m(上)、3600m(下)的相干切片

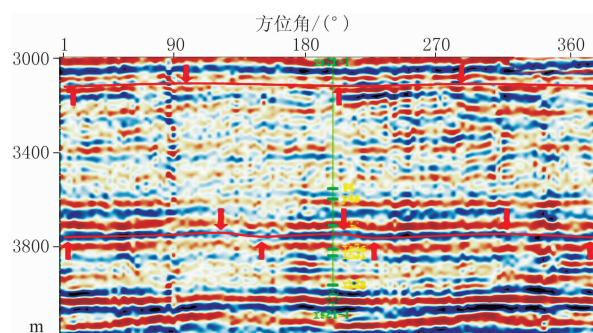


图 8 观测井位置相应深度的方位角道集

明该处存在南北向的断裂或裂隙; 在深度 3760m 时 100°、200° 和 300° 三个方向有最小深度点, 0°、120° 和 210° 有三个极大深度点, 说明火成岩内存在多个方向的断裂或裂隙影响。

4 结束语

本文利用 8 方向 WVSP 数据和全方位地面地震数据研究深部火成岩 VTI 和 HTI 特性以及各向异性参数的计算方法, 可得出如下结论: 依据 8 方向 WVSP 数据能够获得与 3D VSP 数据一致的 VTI 各向异性参数, 分别利用多个单方向 WVSP 数据获得的相对 HTI 变化参数能够描述介质的横向各向异性, 判断介质的裂缝空变特点, HTI 介质的相对空间信息有助于裂缝性储层的预测。

参考文献

- [1] Thomsen L. Weak elastic anisotropy. *Geophysics*, 1986, 51(10):1954~1966
- [2] Banik N C. An effective anisotropy parameter in transversely isotropic media. *Geophysics*, 1987, 52(12): 1654~1664
- [3] Tsvankin I and Thomsen L. Nonhyperbolic reflection moveout in anisotropic media. *Geophysics*, 1994, 59(8):1290~1304
- [4] Alkhalifah T and Tsvankin I. Velocity analysis for transversely isotropic media. *Geophysics*, 1995, 60(5): 1550~1566
- [5] Schoenberg M and Sayers C M. Seismic anisotropy of fractured rock. *Geophysics*, 1995, 60(1): 204~211
- [6] Bakulin A, Grechka V and Tsvankin I. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data-Part I: HTI model due to a single fracture set. *Geophysics*, 2000, 65(6): 1788~1802
- [7] 凌云, 郭向宇, 孙祥娥, 高军, 孙德胜, 林吉祥. 地震勘探中的各向异性影响问题研究. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(4): 606~623

(本文编辑: 金文昱)