

尹志恒,李向阳,魏建新等.利用物理模型三维纵波数据分析 HTI 介质的方位各向异性.地球物理学报,2012,55(11):3805-3812,doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.027.

Yin Z H, Li X Y, Wei J X, et al. A physical modeling study on the 3D P-wave azimuthal anisotropy in HTI media. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(11):3805-3812,doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.027.

利用物理模型三维纵波数据分析 HTI 介质的方位各向异性

尹志恒^{1,2},李向阳¹,魏建新¹,狄帮让¹,张四海¹,吴满生¹

1 中国石油大学(北京)CNPC 物探重点实验室,北京 102249

2 中国石油化工集团国际石油工程有限公司,北京 100029

摘 要 本文通过理论计算、数值模拟与穹窿物理模型三维数据对比分析的方法,对 HTI 介质中纵波方位各向异性现象进行研究.主要是进行目的层动校正速度以及走时的分析.结果显示,理论数值与实验数值耦合较好,HTI 介质会引起动校正速度以及走时随方位角呈现椭圆形的变化;同时发现,观测系统中最大偏移距与目的层深度的比值以及方位角分布对各向异性分析有较大影响.三维纵波方位各向异性分析对于数据的观测系统设计以及数据质量有较高的要求.

关键词 HTI 介质,裂缝,各向异性,动校正速度,走时

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.027

中图分类号 P631

收稿日期 2011-10-01,2012-09-02 收修定稿

A physical modeling study on the 3D P-wave azimuthal anisotropy in HTI media

YIN Zhi-Heng^{1,2}, LI Xiang-Yang¹, WEI Jian-Xin¹, DI Bang-Rang¹,
ZHANG Si-Hai¹, WU Man-Sheng¹

1 CNPC Key Laboratory of Geophysical Exploration, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2 Sinopec International Petroleum Service Corporation, Beijing 100029, China

Abstract By the method of physical modeling combined with numerical simulation, the paper analyzes the P-wave azimuthal anisotropy phenomena in HTI media, focusing on the normal moveout velocity and travel time of target zone. The results show that theoretical values consist well with the experimental data, and HTI media can cause that V_{nmo} and travel time azimuthal change like an ellipse. Meanwhile, the ratio of maximum offset/depth and data azimuthal distribution are two geometry parameters having big impacts on azimuthal anisotropy analysis. The study needs reasonable geometry design and data with high quality.

Keywords HTI media, Fracture, Anisotropy, Normal Moveout Velocity, Travel time

基金项目 国家科技重大专项项目(2011ZX05019-008)资助.

作者简介 尹志恒,男,1983年7月生,2006年本科毕业于西南石油大学勘查技术与工程专业,2009年获中国石油大学(北京)地球探测与信息技术专业硕士学位,2012年获中国石油大学(北京)地质资源与地质工程专业博士学位,目前工作于中石化国际石油工程有限公司,主要研究领域为地震物理模型和各向异性. E-mail: yin212155@163.com

1 引言

自然裂缝往往会导致地震波各向异性的出现,利用各向异性技术来研究裂缝型油气藏已经成为国内外研究的热点.对于三维纵波勘探来说,纵波走时、动校正速度、振幅以及振幅梯度都会因为裂缝的存在,呈现出方位各向异性的变化. Luo 等^[1]利用物理模型进行过裂缝识别. 尹志恒等^[2]利用 3 条 2D 测线数据研究了 HTI(Traverse Isotropy with Horizontal axis,具有水平对称轴的横向各向同性)介质模型中品质因子随方位角的变化. 魏建新等^[3-6]通过物理模型研究了不同参数裂缝对纵波的影响. Li^[7]利用多分量地震数据进行了裂缝储层描述. Ekanem^[8]从走时和衰减特性两个方面进行了裂缝探测研究. 以往的研究多使用公式推导数值模拟或者实际野外资料来研究裂缝引起的各向异性变化,然而这些研究都存在本身的一些问题:数值方法需要实际数据的验证,而直接对野外数据进行研究存在地层参数未知、研究难度大等问题. 对此,物理模型的研究就突显其优势,一方面模型的各项参数已知,另一方面裂缝参数以及裂缝发育方向可控,对于寻求纵波地震响应与各向异性介质之间的关系更为方便有效. 此外,过去的一些研究多采用 2D 数据,虽然可以看出存在各向异性的现象,但是利用 3D 数据进行的研究能使裂缝引起方位各向异性的认识更加深刻,对实际生产工作更有意义.

本文思路是使用物理模型的三维纵波数据,通过数值模拟结合物理模拟验证的方法,来研究 HTI 介质引起的纵波动校正速度以及走时的方位各向异

性变化. 本文使用的公式出自以 Tsvankin 为代表的科罗拉多矿院 CWP 研究小组的研究^[9-13]. 首先,结合物理模型数据特点进行处理,抽出大面元数据,分方位角进行分析. 其次,根据理论公式进行数值模拟. 最后,对比数模与物模的结果,做出分析总结.

2 物理模型以及数据采集

如图 1 所示,本文使用的物理模型由 4 个水平层组成. 第一层是混合材料制作而成,第二层和第四层的材料是环氧树脂,这三层都是各向同性介质. 第一二层模拟储层的上覆地层,第四层模拟整体地质体的底层. 模型的第三层是本文的目的层,即人工石灰岩储层,材料是由纤维织物和树脂混合而成,模拟由垂直裂缝形成的 HTI 介质. 在裂缝层中有两个构造,一个是穹窿构造,另外一个断层构造,它们不是我们研究的重点. 模型尺寸与实际地质体的比例是 1:10000,数据采集使用的换能器的频率与实际情况比例为 10000:1,模型的速度与实际情况比例为 1:1,模型示意图见图 1. 实验室通过测试不同入射角的速度信息计算得出了 HTI 介质的弹性参数,

表 1 模型的速度和密度参数

Table 1 Velocity and density parameters of the model

模型层	速度 (m/s)				密度 (g/cm ³)
	V _{PX}	V _{PY}	V _{SX}	V _{SZ}	
第一层	1770	1770	980	980	1.16
第二层	2648	2648	1180	1180	1.2
第三层(裂缝层)	2960	3642	1490	2010	1.44
第四层	2648	2648	1180	1180	1.2

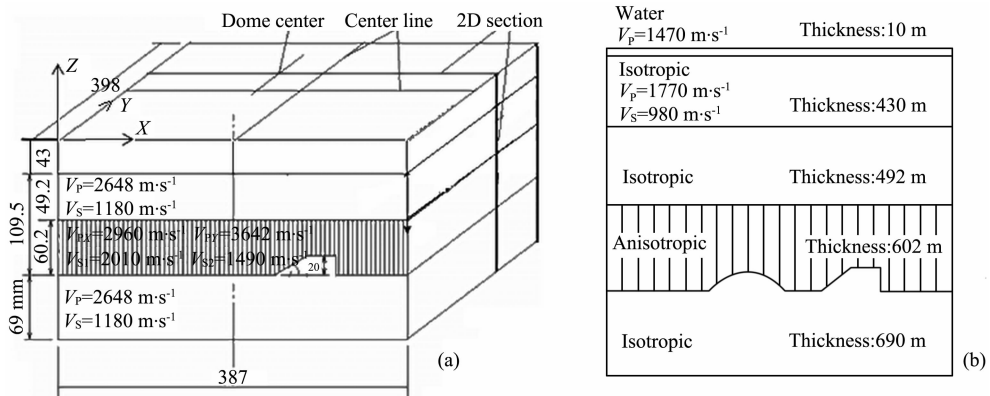


图 1 穹窿模型示意图

(a) 3D 物理模型; (b) 采集时沿 X 方向中线的 2D 切片示意图.

Fig. 1 Sketch map of physical model

(a) 3D physical model; (b) 2D section through middle line in X direction.

结果呈现弱的正交各向异性. 虽然,我们是按照单组裂缝设计对目的层进行加工制造,但是由于制造工艺方面的问题,在进行材料压实时,不可避免产生微裂缝. 这一点也更符合野外的实际情况,造成正交各向异性的出现. 通过计算 XZ 和 YZ 面内的

Thomsen 纵波各向异性参数 ϵ , 我们发现 ϵ_{YZ} 值为 0.372, 要远大于 ϵ_{XZ} 的值 0.076. 这说明虽然裂缝层呈现弱正交各向异性,但是纵波各向异性的变化主要是由于 YZ 面发育的单组裂缝引起的,所以还是把它视为 HTI 介质进行分析(见表 2).

表 2 HTI 介质的弹性参数(单位 10^9 N/m^2)以及 Thomsen 参数
Table 2 Elastic constants (10^9 N/m^2) and Thomsen parameters of HTI media

C_{11}	C_{22}	C_{33}	C_{44}	C_{55}	C_{66}	C_{12}	C_{13}	C_{23}	ϵ	γ
12.704	19.233	22.162	5.858	3.299	3.219	7.865	8.199	9.320	0.372	0.41

进行 3D 数据采集时,将模型至于水槽之中,水面到模型顶面距离 10 mm. 为保证后续分析的效果,我们设计了宽方位大偏移距的观测系统,参数见表 3. 数据的最大偏移距/目的层深度的值为 1.33, 方位角和偏移距关系如图 2 所示. 数据 crossline 方向是 Y 方向,即平行于裂缝走向;inline 方向是 X 方向,即垂直于裂缝走向. 数据采集所使用的换能器是由本实验室自己研制的,激发频率是 300 kHz,频带范围是 120~470 kHz,有负载时,主频会降低.

比较清晰准确.

由于模型都是水平层,所以未作叠前偏移,进行后续分析使用的数据是动校正后的道集数据. 我们先提取了一个 $220 \text{ m} \times 220 \text{ m}$ 的超道集,定性分析一下 HTI 介质中的各向异性现象,这里以及以后的单位都已经经过换算,与实际情况一致. 超道集的位置位于构造之外,避免了构造对分析结果的影响. 在分析中,定义 X 方向为方位角 0° 方向, Y 轴负方向为 90° 方向.

首先,将超道集里面偏移距 0~1500 m 的方位角 0° 数据与方位角 90° 数据提出来,进行比较. 可以看出在远偏移距,走时会不同,如图 4 方框所示,垂直于裂缝走向的方位角 0° 数据走时更长一些. 由于观测系统的原因,方位角 0° 附近的数据要更丰富.

然后,再把按照常规流程进行动校正之后的超道集数据,按照方位角 $90^\circ \sim 270^\circ$ 进行叠加显示. 采用这段数据,原因是图 2 显示这一范围,信息丰富. 如图 5 显示,对于近偏移距数据,各向同性的动校正方法误差不大,轴基本都已经拉平. 但是随着偏移距的增加,就会出现校正不平的情况. 随着方位角的变化,目的层同相轴不再是水平的,而是出现波浪形状. 波谷出现在方位角 180° 的附近,说明动校正速度最小,纵波传播的慢,这符合垂直于裂缝方向波的传播特征.

由上述定性分析可以知道,裂缝介质的存在会对纵波走时以及动校正速度产生影响,要想进一步了解这种影响,则需要定量研究.

3 初步处理分析

数据的处理使用 ProMAX 软件. 物理模型数据信噪比高,处理流程相对简单:建观、加载、去噪、预测反褶积、速度分析、动校正、叠加、叠后 Kirchhoff 时间偏移. 做最后两步的目的是为了确定模型目的层同相轴的位置,为后续分析做准备以及观察 HTI 介质对构造成像的影响. 结果如图 3 所示. 可以看出,HTI 介质对构造成像没有大的影响,成像都

4 叠加速度分析

在各向异性的研究中,传统弹性参数的分析方法存在参数个数多以及参数物理意义不明确的缺点. 鉴于此,Thomsen^[14](1986)提出了 TI(Transverse

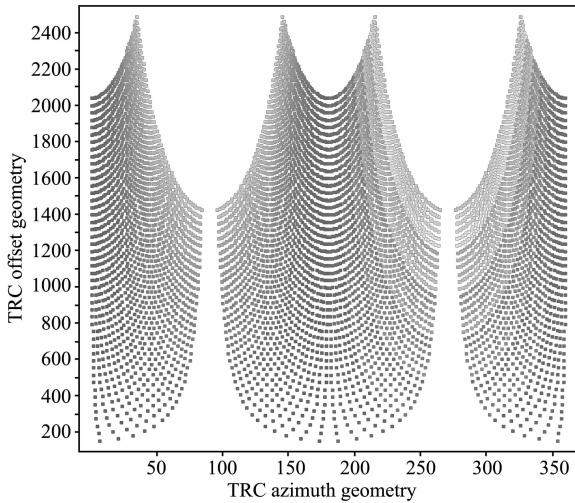


图 2 满覆盖区域的方位角-偏移距关系图

Fig. 2 Azimuth-offset in full-fold area

表 3 观测系统参数

Table 3 Geometry of model

炮线距	炮间距	记录长度	总炮数	接收线距	最大道/炮	检波点间距	最大覆盖	最大偏移距	面元大小	最小偏移距	采样间隔
240 m	40 m	8 s	2340	240 m	576	40 m	48	2485 m	20 m×20 m	160 m	2 ms

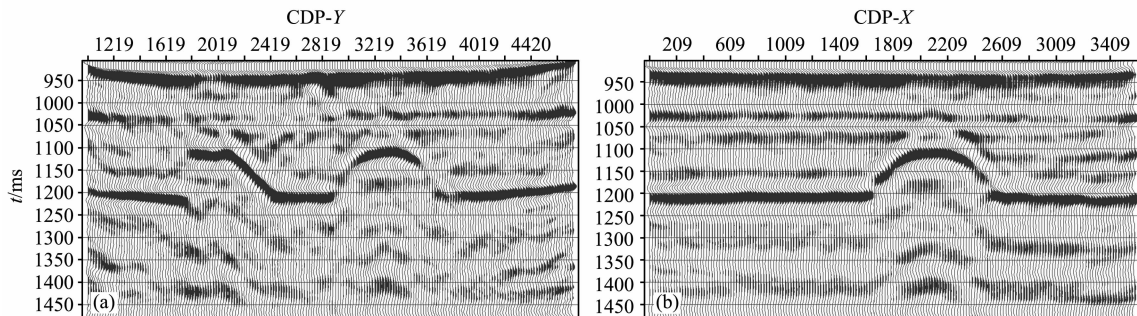


图 3 目的层的成像

(a)inline 过穹顶剖面;(b)crossline 过穹顶剖面.

Fig. 3 Imaging of target zone

(a) inline section through doom center;(b) crossline section through doom center.

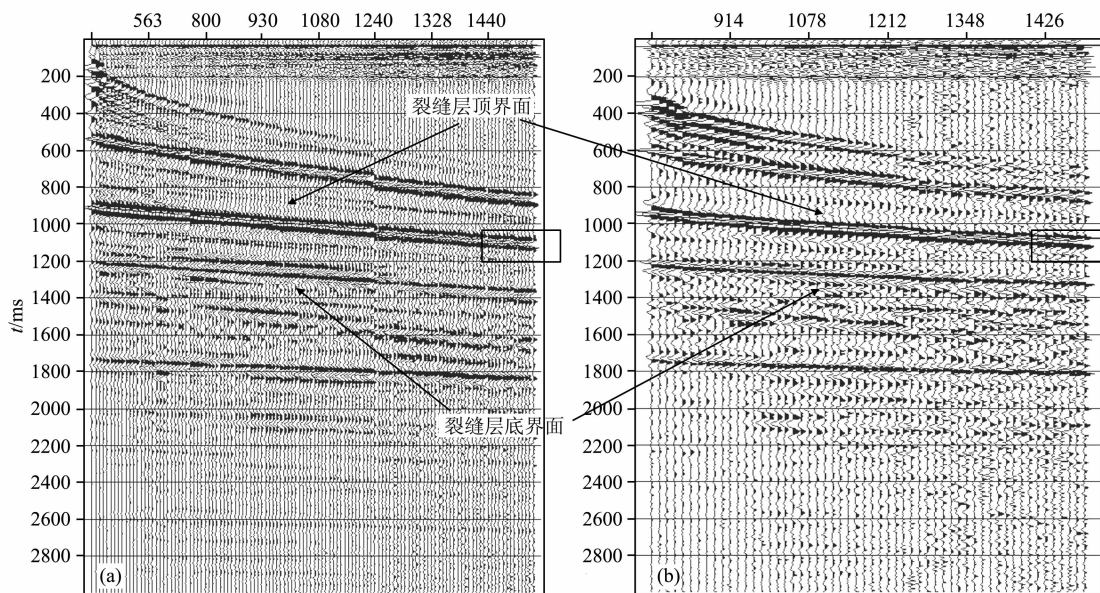


图 4 超道集中不同方位角数据对比

(a)方位角 0°;(b)方位角 90°.

Fig. 4 Different azimuthal data in super-gather

(a)Azimuth 0°;(b)Azimuth 90°.

Isotropic,横向各向同性)介质中五个各向异性系数.

Tsvankin^[9](1997)按照这个思想,提出了针对 HTI 介质的五个分析参数,分别是:

$$V_{P\text{vert}} = \sqrt{\frac{c_{33}}{\rho}}, \quad (1)$$

$$V_{S\perp\text{vert}} = \sqrt{\frac{c_{55}}{\rho}}, \quad (2)$$

$$\epsilon^{(V)} = \frac{c_{11} - c_{33}}{2c_{33}}, \quad (3)$$

$$\gamma^{(V)} = \frac{c_{66} - c_{44}}{2c_{44}}, \quad (4)$$

$$\delta^{(V)} = \frac{(c_{13} + c_{55})^2 - (c_{33} - c_{55})^2}{2c_{33}(c_{33} - c_{55})}. \quad (5)$$

这五个参数与 Thomsen 参数类似,无量纲,其中 $V_{P\text{vert}}$ 和 $V_{S\perp\text{vert}}$ 分别表示纵波和横波的垂直速度, $\epsilon^{(V)}$ 描述了 HTI 介质中纵波各向异性差异, $\gamma^{(V)}$ 描述了横波的各向异性差异, $\delta^{(V)}$ 与波前的椭圆形状有关.

此外,Tsvankin^[9](1997)还提出了 HTI 介质中

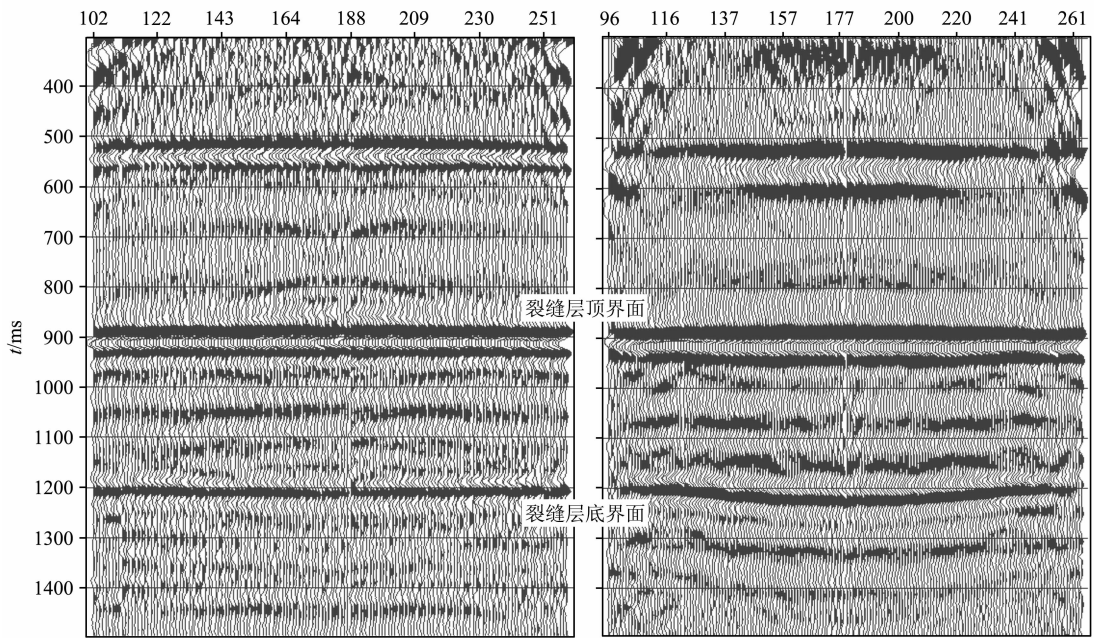


图 5 超道集中按方位角叠加剖面

(a) 偏移距 0~800 m; (b) 偏移距 800~1600 m.

Fig. 5 Stack profile at azimuth 90°~270° in super-gather

(a) Offset 0~800 m; (b) Offset 800~1600 m.

动校正速度的表达式:

$$V_{\text{nmno}}^2 = V_{\text{vert}}^2 \frac{1 + A}{1 + A \sin^2 \alpha}, \quad (6)$$

其中 α 是测线与 HTI 介质对称轴 X 方向的夹角, 即所谓的方位角. 对于纵波来说, A 值为 $2\delta^{(V)}$. 将物理模型的参数代入公式, 很容易得出单层的 V_{nmno} (即 (7) 式中的 $V_{\text{nmno}i}$). 要得到目的层的动校正速度还需要运用下列公式:

$$V_{\text{nmno}}^2 = \frac{1}{t_0} \sum_{i=1}^N V_{\text{nmno}i}^2 \Delta t_i, \quad (7)$$

其中 t_0 是反射层 N 的零偏移距的双程走时, $V_{\text{nmno}i}$ 是每个单层 i 的动校正速度, Δt_i 是层 i 的零偏移距的双程走时. 模型每层的厚度和速度已知, 而且是各向同性层, 所以代入公式很容易就得到目的层随方位角变化的动校正速度.

对于物理模型来说, 我们用 ProMAX 处理软件来获取 V_{nmno} , 软件使用传统速度扫描的方法. 先将上边提取的超道集按照方位角分为子道集. 为了使得子道集中有足够的数据进行速度分析, 每个方位角道集包括方位角 $\pm 15^\circ$ 的数据信息. 例如, 将 $75^\circ \sim 105^\circ$ 的数据都视为 90° 的方位角子道集的数据. 对于 HTI 介质, 由于对称原因, 不需要全部 360° 的数据进行分析, 所以从 0° 到 180° 的每隔 30° 共分为了 7 个方位角子道集. 然后对不同的方位角道集进行速

度分析, 记录下目的层位置的动校正速度. 为了保证结果的有效性, 又拾取了另外两个超道集, 进行了相似的处理流程. 然后记录下 ProMAX 处理软件在各个方位角道集按照各向同性分析得到的 V_{nmno} 平均值, 进行分析的三个超道集拾取的动校正速度误差小于 ± 30 m/s. 同时, 记录了由公式 (7) 得到的理论数值, 并与实验数据进行对比, 见表 4.

表 4 不同方位角的目的层动校正速度

Table 4 Azimuthal different V_{nmno} of target zone

方位角	实验数据 (m/s)	理论数值 (m/s)	误差大小
0°	2422.9	2354.5	2.8%
30°	2529.5	2418.2	4.4%
60°	2654.3	2620.0	1.3%
90°	2783.6	2794.8	0.4%
120°	2638.4	2620.0	0.7%
150°	2509.5	2418.2	3.6%
180°	2422.0	2354.5	2.8%

通过对比分析, 可以看出两者拟合的效果还是比较理想的. 这是因为对于物理模型, 各层介质的速度等参数都是已知的, 所以与理论预测结果比较接近. 从拟合的曲线可以看出, 对于 HTI 介质, 动校正速度随方位角呈现椭圆形的变化 (见图 6). 我们可以根据椭圆的长短轴来识别裂缝的走向, 长轴指示裂缝的发育方向, 短轴是其垂直方向, 而从长短轴

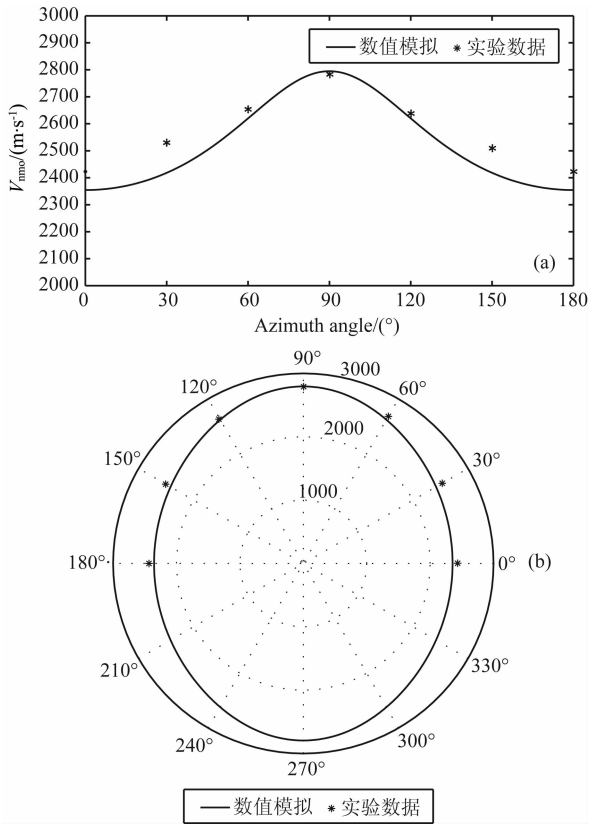


图 6 目的层动校正速度 (m/s) 数值模拟与实验数据对比
(a) 直角坐标显示; (b) 极坐标显示.

Fig. 6 Comparison of V_{mno} (m/s) between numerical simulation and experimental data
(a) Rectangular coordinates; (b) Polar coordinates.

的比值可以看出介质速度各向异性的大小.

5 走时分析

对于各向异性介质, 时距曲线不再是标准的双曲线形状. Al-Dajani 和 Tsvankin^[10] (1998) 提出了更为准确的各向异性介质中纵波走时的表达式:

$$t^2 = t_0^2 + A_2 x^2 + \frac{A_4 x^4}{1 + A_2 x^2}, \quad (8)$$

$$A = A_4 / \left(\frac{1}{V_{hor}^2} - \frac{1}{V_{mno}^2} \right), \quad (9)$$

$$\frac{V_{hor}^2(\alpha)}{V_{Pvert}^2} = 1 + \epsilon^{(V)} \cos^2 \alpha - \frac{f^{(V)}}{2} + \frac{f^{(V)}}{2} \sqrt{\left(1 + \frac{2\epsilon^{(V)} \cos^2 \alpha}{f^{(V)}} \right)^2 - \frac{2(\epsilon^{(V)} - \delta^{(V)}) \sin^2 2\alpha}{f^{(V)}}}, \quad (10)$$

$$A_4(\alpha) = \left[\frac{-2(\epsilon^{(V)} - \delta^{(V)})(1 + 2\delta^{(V)}/f^{(V)})}{t_0^2 V_{Pvert}^4 (1 + 2\delta^{(V)})^4} \right] \cos^4 \alpha, \quad (11)$$

$$f^{(V)} = 1 - (V_{S\perp vert}/V_{Pvert})^2, \quad (12)$$

$$x = 2h \tan \theta, \quad (13)$$

其中 h 是层厚度, V_{mno} 用式(6)计算得出, 即单层的动校正速度; t_0 是目的层的零偏移距的双程走时; α 是方位角; θ 是入射角. 通过上述公式的计算, 就可以得到目的层单层的走时. 将得到的单层时间加上上覆各向同性地层的走时, 就可以得到随方位角变化的目的位置(裂缝层底界面)全程反射时间曲线. 从公式中可以看出走时同时受到入射角以及方位角的影响.

对于物理模型数据, 也要按照不同入射角和方位角进行分析. 同第 4 节一样, 分析是基于动校正之前的超道集数据. 本来想要分为入射角 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 三组数据进行观察, 对于更大的入射角数据, 已经无法很好地区分有效波和干扰波. 从式(13)得出, 对应裂缝层底界面深度, 入射角 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 的位置分别对应着偏移距 541 m, 1117 m, 1771 m. 每组包括偏移距 ± 40 m 的信息. 例如, 将 500~580 m 的数据都视为入射角 10° 的数据进行分析.

将不同入射角数据按照方位角进行叠加显示. 图 7 是根据公式模拟出来的裂缝层底界面的走时方位变化曲线. 从图中可以看出, 随着入射角的增大, 即偏移距的增大, 各向异性的情况在变强. 图 8 实验数据验证了这一变化, 我们使用其它 2 组数据也进行了分析, 也呈现相同的变化趋势, 这里只展示了效果比较好的一组. 说明对于近偏移距数据处理时, 可以忽视各向异性的影响, 但是偏移距越大影响越大, 如果再忽略各向异性, 就会出现前边提到过的动校正不平的情况. 可惜再大偏移距的走时变化, 需要更有效的处理手段才能够显示出来, 然而入射角 30° 的信息已经能够说明问题.

公式(8)比传统的双曲线公式多了一个随偏移距变化的四阶项, 它描述了远偏移距的走时的变化.

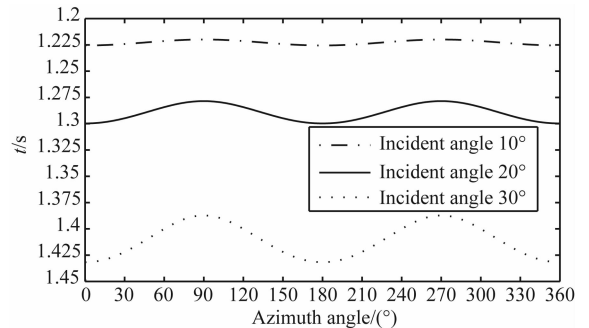


图 7 随方位角变化的不同入射角走时(数值模拟)
Fig. 7 Different azimuthal travel time with incident angle (numerical simulation)

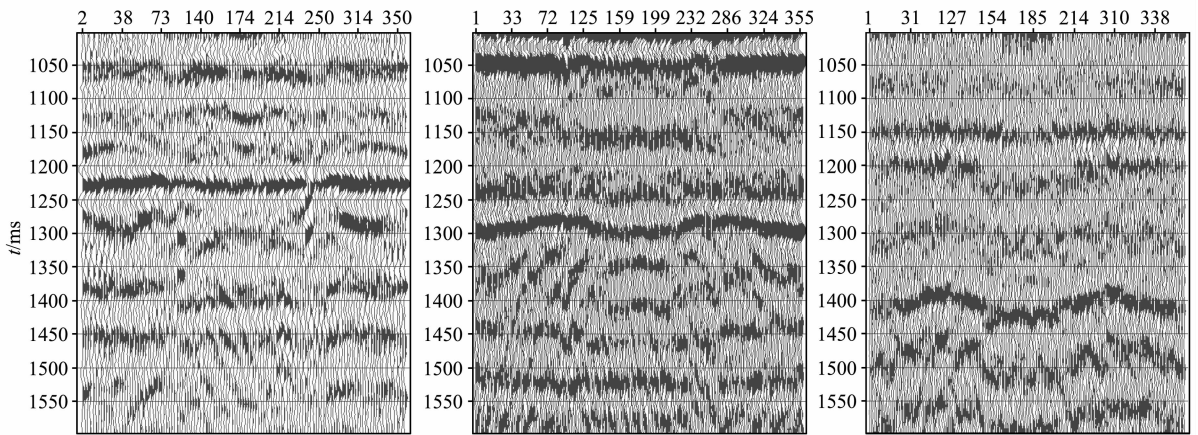


图 8 随方位角变化的不同入射角走时(实验数据),从左至右依次是目的层深度入射角 10° , 20° , 30° 的走时显示
 Fig. 8 Different azimuthal travel time with incident angle (experimental data), from left to right, travel time in incident angle 10° , 20° , 30°

从实验数据来看,公式(8)是准确的,可以为将来各向异性处理以及反演提供帮助。

6 各向异性程度分析

为了方便进行各向异性差异的分析,首先我们模仿 Thomsen(1986)分析纵波各向异性程度大小的方法,定义了一个用参数最大值和最小值来表征各向异性大小的量 ΔZ :

$$\Delta Z = \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{Z_{\max}}, \quad (14)$$

其中 Z 就是用于描述的参数。

根据这个公式,我们计算得到动校正速度的实验数据的 ΔV_{mo} 值为 0.13,数值模拟的 ΔV_{mo} 值为 0.16。由于时间剖面上的目的层走时难以准确拾取,只计算了数值模拟时 30° 入射角的走时 ΔT 值为 0.10。而由已知的物理模型参数,即裂缝介质不同方向的纵波速度,计算得到的 ΔV_P 值为 0.18。由上边的分析可以看出,裂缝引起的方位各向异性变化是一致的,即平行于裂缝走向与垂直于裂缝走向的方向上,各种分析参数的差异最大。和已知物理参数分析结果对比,实验得出的动校正速度和走时的方位各向异性程度要略小,这可能是由于采集或者后续处理分析手段等影响因素引起的。

首先,我们认为最大偏移距/目标深度比值对各向异性分析影响较大。入射角信息,对于数据来说,是无法改变的,它和数据采集时的观测系统定义有关。入射角反映在观测系统上,就是最大偏移距与目标深度的比值,比值越大各向异性程度越大。走时各

向异性差异大小为 0.13 时,入射角必须要达到 37° ,即为最大偏移距/目标深度比值等于 1.5;当比值为 2.5 时,即入射角为 51° ,走时的 ΔT 各向异性值达到了 0.18。这和图 7 的变化趋势是相同的,只是图 7 中各向异性程度要小一些。

对于同一组数据,在用纵波传播特征来进行裂缝识别等分析时,我们当然希望使用各向异性更加明显的参数。因为各向异性程度越大变化越明显,识别分析起来将更加容易,特别是对于实际数据,处理相对困难,有效波不是很明显的变化,可能会被噪声等其它干扰信息所掩盖。所以大偏移距观测系统的设计对于走时各向异性分析至关重要。其实,对于动校正速度分析也很重要。从上边的分析可以看出,当只有近偏移距信息时,各向异性影响不明显,不可能拾取得到准确的动校正速度。当远偏移距信息足够丰富,才能有效地进行速度拾取。

此外,在进行实验研究的过程中,我们发现方位角信息分布不均匀对后续分析影响也比较大。从图 2 可以看出,模型裂缝的发育方向的方位角为 90° ,但由于观测系统的设计,造成这一区域的信息量最小,为了进行分析,必须加入此方位角周围数据。如果方位角信息的分布更均匀一些的话,就可以进行更细致更准确的方位角研究。所以,在了解到裂缝大致发育方向的情况下,应该设计更合理的观测系统,保证在此方向上数据量丰富。这一点对于实验研究以及实际野外采集都很有指导意义。

当然,高质量的数据资料,尤其是好的远道数据,也是进行方位各向异性分析所需要的,质量差的资料很可能造成结果的不准确,甚至研究失败。

7 结 论

本文通过使用实验室穹窿物理模型三维实验数据研究了裂缝引起的 HTI 介质中动校正速度以及走时随方位角的变化. 由理论模拟和实验分析, 得到以下几点认识:

(1) 实验数据显示了 HTI 介质引起方位各向异性现象和理论公式预测结果耦合比较好, 验证了公式的准确性. 文章中提到的理论公式可以用于 HTI 介质的处理流程或者速度反演分析等方面.

(2) 理论值与实验值的良好耦合, 是由于物理模型各项参数已知, 应用研究比较方便. 这一方面说明在实际生产中, 获取准确地层参数对各向异性研究的重要意义, 另外一方面也说明了物理模型在各向异性研究中的独特优势.

(3) 通过分析研究, 认识到最大偏移距与目标深度比值以及方位角信息的分布对方位各向异性的研究影响比较大, 尤其是前者. 这对三维观测系统的设计有指导意义.

致 谢 感谢中国石油大学(北京)刘洋教授和陈双全老师的指导.

参考文献 (References)

- [1] Luo M, Arihara N, Wang S G, et al. Abnormal transmission attenuation and its impact on seismic-fracture prediction—A physical modeling study. *Geophysics*, 2006, 71(1): 15-22.
- [2] 尹志恒, 魏建新, 狄帮让等. 利用 Q 值各向异性识别裂缝走向. *石油地球物理勘探*, 2011, 46(3): 429-433.
- Yin Z H, Wei J X, Di B R, et al. Fracture orientation detection using Q anisotropy. *Oil Geophys. Prospec.* (in Chinese), 2011, 46(3): 429-433.
- [3] Wei J X, Di B R, Li X Y. Effects of fracture scale length and

aperture on seismic waves; An experimental study. *J. Seis. Explor.*, 2007, 16(2): 265-280.

- [4] 魏建新, 狄帮让. 裂隙密度对纵波传播特性影响的实验观测. *石油地球物理勘探*, 2007, 42(5): 554-559.
- Wei J X, Di B R. Experimentally surveying influence of fractural density on P-wave propagating characters. *Oil Geophys. Prospec.* (in Chinese), 2007, 42(5): 554-559.
- [5] 魏建新, 王椿镛. 各向异性介质中横波测试技术实验研究. *石油物探*, 2004, 43(5): 427-432.
- Wei J X, Wang C Y. Experiment on shear wave observation in anisotropy medium. *Geophys. Prospec. Petrol.* (in Chinese), 2004, 43(5): 427-432.
- [6] 魏建新, 王椿镛. 横波测试技术的实验室研究. *石油地球物理勘探*, 2003, 38(6): 630-635.
- Wei J X, Wang C Y. Study of S-wave test and measurement technique in laboratory. *Oil Geophys. Prospec.* (in Chinese), 2003, 38(6): 630-635.
- [7] Li X Y. Fracture reservoir delineating using multi-component seismic data. *Geophys. Prospec.*, 1997, 54(1): 39-64.
- [8] Ekanem A M. Fracture detection using 2-D P-wave seismic data: A seismic physical modeling study. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2009, 28: 2647-2651.
- [9] Tsvankin I. Reflection moveout and parameter estimation for horizontal transverse isotropy. *Geophysics*, 1997, 62(2): 614-629.
- [10] Al-Dajani A, Tsvankin I. Nonhyperbolic reflection moveout for horizontal transverse isotropy. *Geophysics*, 1998, 63(5): 1738-1753.
- [11] Tsvankin I. Normal moveout from dipping reflectors in anisotropic media. *Geophysics*, 1995, 60(1): 268-284.
- [12] Tsvankin I. P-wave signatures and notation for transversely isotropic media: An overview. *Geophysics*, 1996, 61(2): 467-483.
- [13] Tsvankin I, Chesnokov E. Synthesis of body-wave seismograms from point sources in anisotropic media. *J. Geophys. Res.*, 1990, 95(B7): 11317-11331.
- [14] Thomsen L. Weak elastic anisotropy. *Geophysics*, 1986, 51(10): 1954-1966.

(本文编辑 何 燕)