



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109655908 A

(43)申请公布日 2019.04.19

(21)申请号 201710942969.4

(22)申请日 2017.10.11

(71)申请人 中国石油化工股份有限公司

地址 100728 北京市朝阳区朝阳门北大街  
22号

申请人 中国石油化工股份有限公司石油物  
探技术研究院

(72)发明人 陈楠 徐雷鸣

(74)专利代理机构 北京思创毕升专利事务所  
11218

代理人 孙向民 廉莉莉

(51)Int.Cl.

G01V 1/30(2006.01)

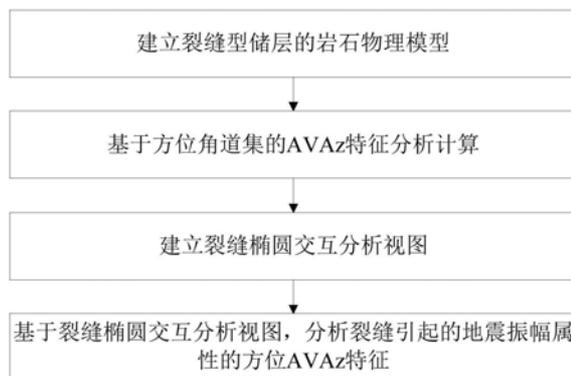
权利要求书2页 说明书9页 附图4页

## (54)发明名称

基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟方法及系统

## (57)摘要

本发明公开了一种基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟方法及系统,方法包括:建立裂缝型储层的岩石物理模型;基于方位角道集的AVAz特征分析计算;建立裂缝椭圆交互分析视图;基于裂缝椭圆交互分析视图,分析裂缝引起的地震振幅属性的方位AVAz特征。其优点在于:利用地震属性数据实时分析地下裂缝型储层的地震响应规律;解决地震振幅数据方位各向异性特征的不确定性导致的各向异性椭圆解释成果错误问题,确定椭圆的正确方位指示;为叠前裂缝检测提供正演分析工具,完善并扩充检测流程。在实际生产应用的效果表明,正演的解释结论能够为叠前裂缝检测提供有效的理论依据,增强了反演裂缝方位数据的准确性与可信度。



1. 一种基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟方法,其特征在于,所述正演模拟方法包括:

建立裂缝型储层的岩石物理模型;

基于方位角道集的AVAz特征分析计算;

建立裂缝椭圆交互分析视图;

基于所述裂缝椭圆交互分析视图,分析裂缝引起的地震振幅属性的方位AVAz特征。

2. 根据权利要求1所述的基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟方法,其中,所述建立裂缝型储层的岩石物理模型包括:通过拾取实际井的横波、纵波、密度数据和子波数据,结合各向异性参数和分析层段参数,计算任一层段反射系数与子波的褶积,建立所述裂缝型储层的岩石物理模型。

3. 根据权利要求1所述的基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟方法,其中,所述基于方位角道集的AVAz特征分析计算包括:

通过对正演模拟所述方位角道集裂缝型储层的交互拾取,获取各个方位的地震属性数据;

基于所述地震属性数据,获取一套分方位、分角度的地震属性数据交汇图;

基于所述地震属性数据交汇图,实时显示方位角道集的振幅随偏移距的变化特征曲线;

通过在所述振幅随偏移距的变化特征曲线的交互拾取,提取各方位任一入射角的所述地震属性数据,拟合在椭圆方程上。

4. 根据权利要求3所述的基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟方法,其中,对任一平面上的一组样本点,以所述椭圆方程为模型进行拟合,并计算出所述椭圆方程的椭圆长轴长度、短轴长度、长轴与正北方向顺时针的夹角的参数值。

5. 根据权利要求3所述的基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟方法,其中,在HTI垂直裂缝型介质中,所述正演模拟时与正北方向的夹角为 $0^{\circ}$ 为裂缝走向,与正北方向的夹角为 $90^{\circ}$ 时代表裂缝法向。

6. 根据权利要求5所述的基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟方法,其中,所述建立裂缝椭圆交互分析视图包括:

获取所述各个方位的任一时间点振幅数据,投影至所述地震属性数据交汇图;

基于所述地震属性数据交汇图,获取任一入射角的所述各个方位的振幅数据;

将所述各个方位的振幅数据投影至极坐标;

基于所述椭圆方程的拟合,获取裂缝的长短轴指示方向。

7. 根据权利要求6所述的基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟方法,其中,基于所述HTI垂直裂缝型介质的方位定义,分析各向异性椭圆方程视图,得到裂缝方向指示为长轴,即该层位所述各向异性椭圆方程的长轴平行于所述裂缝方向。

8. 根据权利要求7所述的基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟方法,其中,所述地震振幅属性的方位AVAz特征包括实时获取所述各向异性椭圆方程长轴的方向与裂缝方向的关系和裂缝模型的密度。

9. 一种基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟系统,其特征在于,所述正演模拟系统包括:

存储器,存储有计算机可执行指令;  
处理器,所述处理器运行所述存储器中的计算机可执行指令,执行以下步骤:  
建立裂缝型储层的岩石物理模型;  
基于方位角道集的AVAz特征分析计算;  
建立裂缝椭圆交互分析视图;  
基于所述裂缝椭圆交互分析视图,分析裂缝引起的地震振幅属性的方位AVAz特征。

10. 根据权利要求9所述的基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟系统,其中,所述建立裂缝型储层的岩石物理模型包括:通过拾取实际井的横波、纵波、密度数据和子波数据,结合各向异性参数和分析层段参数,计算任一层段反射系数与子波的褶积,建立所述裂缝型储层的岩石物理模型。

## 基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及油气地球物理勘探领域,更具体地,涉及一种基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟方法及系统。

### 背景技术

[0002] 世界油气勘探开发实践表明,几乎所有的油气藏都和裂缝有关,超过60%的油气藏可以归结为裂缝型油气藏,裂缝为储层提供了基本的存储空间和运移通道,在大多数碳酸盐岩和非常规致密油气、页岩油气储层中具有至关重要的作用,所以裂缝储层一直是非常规油气藏的研究热点。通过长期的研究发现:地震波在HTI介质传播时,其反射振幅、衰减、频率和速度与传播的方位相关(AVAz),即与裂缝的走向和密度有关。根据这个原理,利用叠前地震资料提取方位地震属性如振幅、衰减、频率、方位速度等可以检测HTI或近似HTI型的裂缝。一些研究结论表明:1、纵波垂直于裂缝带传播时会产生比较明显的旅行时延迟和衰减,并有反射强度降低和频率变低等现象;2、地震频率的衰减与裂缝密度场的空间变化有关,在沿裂缝走向方向随偏移距(入射角)的增加衰减慢,而垂直裂缝走向方向随偏移距(入射角)的增加衰减快,裂缝密度越大衰减幅度越快;3、振幅随偏移距的变化(Amplitude variation with offset,AVO)随方位角的变化关系(即AVO梯度)反映了岩石硬度的变化。这些研究表明,利用叠前地震资料提取方位地震属性如振幅、速度、主频、衰减等检测裂缝型储层是完全可行的,可以实现对裂缝方位、裂缝密度等参数信息的描述。通过对与方位角有关的地震属性研究结论发现,部分地震属性数据在方位各向异性上都有比较固定的特征,但地震振幅属性却存在不确定性(表1和表2)。

[0003] 表1地震属性的各向异性特征

[0004]

地震属性	方位各向异性特征
速度	沿裂缝走向方向速度衰减慢,而垂直裂缝走向方向速度衰减快
衰减	与裂缝密度场的空间变化有关,沿裂缝走向方向衰减慢,而垂直裂缝走向方向衰减快,裂缝密度越大衰减越快
频率	沿裂缝走向方向频率衰减慢,而垂直裂缝走向方向频率衰减快
振幅	一般情况下沿裂缝走向方向衰减慢,而垂直裂缝走向方向衰减快(但存在不确定性)

[0005] 表2方位椭圆指示关系

[0006]

椭圆 属性	方位	长短轴之比	长轴方向	短轴方向
	速度		裂缝密度	裂缝走向
衰减		裂缝密度	裂缝走向	裂缝法向
频率		裂缝密度	裂缝走向	裂缝法向
振幅		裂缝密度	裂缝走向/法向	裂缝法向/走向

[0007] 因此,有必要开发一种基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟方法及系统,能够为叠前裂缝检测提供有效的理论依据,增强了反演裂缝方位数据的准确性与可信度。

[0008] 公开于本发明背景技术部分的信息仅仅旨在加深对本发明的一般背景技术的理解,而不应当被视为承认或以任何形式暗示该信息构成已为本领域技术人员所公知的现有技术。

### 发明内容

[0009] 本发明提出了一种基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟方法及系统,其能够通过利用地质、测井资料和岩石物理参数,根据岩石物理理论建立裂缝储层的理论地质模型,模拟地震波在已知裂缝模型中传播时各个方位的地震响应,并分析任一区段由裂缝引起的地震振幅属性的方位AVO (AVAZ) 特征,增强了反演裂缝方位数据的准确性与可信度。

[0010] 根据本发明的一方面,提出了一种基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟方法。所述正演模拟方法包括:

[0011] 建立裂缝型储层的岩石物理模型;

[0012] 基于方位角道集的AVAz特征分析计算;

[0013] 建立裂缝椭圆交互分析视图;

[0014] 基于所述裂缝椭圆交互分析视图,分析裂缝引起的地震振幅属性的方位AVAz特征。

[0015] 优选地,所述建立裂缝型储层的岩石物理模型包括:通过拾取实际井的横波、纵波、密度数据和子波数据,结合各向异性参数和分析层段参数,计算任一层段反射系数与子波的褶积,建立所述裂缝型储层的岩石物理模型。

[0016] 优选地,所述基于方位角道集的AVAz特征分析计算包括:

[0017] 通过对正演模拟所述方位角道集裂缝型储层的交互拾取,获取各个方位的地震属性数据;

[0018] 基于所述地震属性数据,获取一套分方位、分角度的地震属性数据交汇图;

[0019] 基于所述地震属性数据交汇图,实时显示方位角道集的振幅随偏移距的变化特征曲线;

[0020] 通过在所述振幅随偏移距的变化特征曲线的交互拾取,提取各方位任一入射角的所述地震属性数据,拟合在椭圆方程上。

[0021] 优选地,对任一平面上的一组样本点,以所述椭圆方程为模型进行拟合,并计算出

所述椭圆方程的椭圆长轴长度、短轴长度、长轴与正北方向顺时针的夹角的参数值。

[0022] 优选地,在HTI垂直裂缝型介质中,所述正演模拟时与正北方向的夹角为 $0^{\circ}$ 为裂缝走向,与正北方向的夹角为 $90^{\circ}$ 时代表裂缝法向。

[0023] 优选地,所述建立裂缝椭圆交互分析视图包括:

[0024] 获取所述各个方位的任一时间点振幅数据,投影至所述地震属性数据交汇图;

[0025] 基于所述地震属性数据交汇图,获取任一入射角的所述各个方位的振幅数据;

[0026] 将所述各个方位的振幅数据投影至极坐标;

[0027] 基于所述椭圆方程的拟合,获取裂缝的长短轴指示方向。

[0028] 优选地,基于所述HTI垂直裂缝型介质的方位定义,分析各向异性椭圆方程视图,得到裂缝方向指示为长轴,即该层位所述各向异性椭圆方程的长轴平行于所述裂缝方向。

[0029] 优选地,所述地震振幅属性的方位AVAz特征包括实时获取所述各向异性椭圆方程长轴的方向与裂缝方向的关系和裂缝模型的密度。

[0030] 根据本发明的另一方面,提出了一种基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟系统,所述正演模拟系统包括:

[0031] 存储器,存储有计算机可执行指令;

[0032] 处理器,所述处理器运行所述存储器中的计算机可执行指令,执行以下步骤:

[0033] 建立裂缝型储层的岩石物理模型;

[0034] 基于方位角道集的AVAz特征分析计算;

[0035] 建立裂缝椭圆交互分析视图;

[0036] 基于所述裂缝椭圆交互分析视图,分析裂缝引起的地震振幅属性的方位AVAz特征。

[0037] 优选地,所述建立裂缝型储层的岩石物理模型包括:通过拾取实际井的横波、纵波、密度数据和子波数据,结合各向异性参数和分析层段参数,计算任一层段反射系数与子波的褶积,建立所述裂缝型储层的岩石物理模型。

[0038] 根据本发明的一种基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟方法及系统,其优点在于:利用地震属性数据实时分析地下裂缝型储层的地震响应规律;解决地震振幅数据方位各向异性特征的不确定性导致的各向异性椭圆解释成果错误问题,确定椭圆的正确方位指示;为叠前裂缝检测提供正演分析工具,完善并扩充检测流程。在实际生产应用的效果表明,正演的解释结论能够为叠前裂缝检测提供有效的理论依据,增强了反演裂缝方位数据的准确性与可信度。

[0039] 本发明的方法及系统具有其它的特性和优点,这些特性和优点从并入本文中的附图和随后的具体实施例中将是显而易见的,或者将在并入本文中的附图和随后的具体实施例中进行详细陈述,这些附图和具体实施例共同用于解释本发明的特定原理。

## 附图说明

[0040] 通过结合附图对本发明示例性实施例进行更详细的描述,本发明的上述以及其它目的、特征和优势将变得更加明显,其中,在本发明示例性实施例中,相同的附图标记通常代表相同部件。

[0041] 图1示出了根据本发明的一个示例性实施例的一种基于HTI介质的方位AVAz的正

演模拟方法的步骤的流程图。

[0042] 图2示出了根据本发明的一个示例性实施例的裂缝型储层的地质模型。

[0043] 图3示出了本发明图2的裂缝型储层的地质模型定义的示意图。

[0044] 图4a、图4b和图4c分别示出了根据本发明的一个示例性实施例的裂缝椭圆交互分析视图。

### 具体实施方式

[0045] 下面将参照附图更详细地描述本发明。虽然附图中显示了本发明的优选实施例，然而应该理解，可以以各种形式实现本发明而不应被这里阐述的实施例所限制。相反，提供这些实施例是为了使本发明更加透彻和完整，并且能够将本发明的范围完整地传达给本领域的技术人员。

[0046] 本发明提出了一种基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟方法，该正演模拟方法包括：

[0047] 建立裂缝型储层的岩石物理模型；

[0048] 基于方位角道集的AVAz特征分析计算；

[0049] 建立裂缝椭圆交互分析视图；

[0050] 基于裂缝椭圆交互分析视图，分析裂缝引起的地震振幅属性的方位AVAz特征。

[0051] 其中，HTI介质反射、透射系数方程完整地表述了该类型介质中平面波反射、透射系数与入射角的关系，但其方程组解析解的表达式十分复杂，很难直接用来分析介质参数对振幅变化的影响。为了明确地表达反射系数、透射系数与弹性常数的关系，利用近似解的方式简化HTI介质P波入射时的振幅随偏移距的变化 (Amplitude variation with offset, AVO) 方程：

$$R_p(i, \phi) = \frac{1}{2} \frac{\Delta Z}{\bar{Z}} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta \alpha}{\bar{\alpha}} - \left( \frac{2\bar{\beta}}{\bar{\alpha}} \right)^2 \frac{\Delta G}{\bar{G}} + [\Delta \delta + 2 \left( \frac{2\bar{\beta}}{\bar{\alpha}} \right)^2 \Delta \gamma] \cos^2 \phi \right\} \sin^2 i$$

$$+ \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta \alpha}{\bar{\alpha}} + \Delta \varepsilon \cos^4 \phi + \Delta \delta \sin^2 \phi \cos^2 \phi \right) \sin^2 i \tan^2 i$$

[0053] 式中， $\bar{Z} = \rho \bar{\alpha}$  为垂直方向纵波的阻抗；

[0054]  $\bar{G} = \rho \bar{\beta}^2$  为横波的模量；

[0055]  $\bar{\alpha}$  为界面上下两侧垂向纵波速度的平均值；

[0056]  $\bar{\beta}$  为横波速度的平均值；

[0057]  $\Delta \varepsilon$  为上下两层各向异性参数差值；

[0058]  $\Delta \gamma$  为上下两层各向异性参数差值；

[0059]  $\Delta \delta$  为上下两层各向异性参数差值；

[0060]  $\rho$  为密度。

[0061] 作为优选方案，建立裂缝型储层的岩石物理模型包括：通过拾取实际井的横波 (S波)、纵波 (P波)、密度数据和子波数据，结合各向异性参数和分析层段参数，计算任一层段反射系数与子波的褶积，建立裂缝型储层的岩石物理模型，即裂缝型储层的地质模型，如图2所示。

[0062] 利用地震属性数据实时分析地下裂缝型储层的地震响应规律。

[0063] 作为优选方案,基于方位角道集的AVAz特征分析计算包括:

[0064] 通过对正演模拟方位角道集裂缝型储层的交互拾取,获取各个方位的地震属性数据;

[0065] 基于地震属性数据,获取一套分方位、分角度的地震属性数据交汇图;

[0066] 基于地震属性数据交汇图,实时显示方位角道集的AVO特征曲线;

[0067] 通过在AVO特征曲线的交互拾取,提取各方位任一入射角的地震属性数据,拟合在椭圆方程上。

[0068] 其中,AVAz为振幅随方位角、入射角的变化(Amplitude variation with Angle and Azimuth)。

[0069] 解决地震振幅数据方位各向异性特征的不确定性导致的各向异性椭圆解释成果错误问题,确定椭圆的正确方位指示。

[0070] 根据叠前各向异性裂缝检测的原理,在HTI介质中,纵波地震资料的AVO梯度和动校正(Normal Moveout,NMO)速度等多个参数都随着方位角呈椭圆形变化,这一特点是利用纵波地震资料检测裂缝的技术基础。

[0071] 为叠前裂缝检测提供正演分析工具,完善并扩充检测流程。

[0072] 作为优选方案,对任一平面上的一组样本点,以所述椭圆方程为模型进行拟合,并计算出所述椭圆方程的椭圆长轴长度、短轴长度、长轴与正北方向顺时针的夹角的参数值。

[0073] 方位椭圆拟合中,椭圆方程为:

$$[0074] \quad Ax^2+Bxy+Cy^2+Dx+Ey+F=0$$

[0075] 可以定义一点(x,y)到椭圆的几何距离为:

$$[0076] \quad F(a,x)=a \cdot x=Ax^2+Bxy+Cy^2+Dx+Ey+F$$

[0077] 其中, $a=[A \ B \ C \ D \ E \ F]^T$ , $x=[x^2 \ xy \ y^2 \ x \ y \ 1]^T$ ;

[0078] 当参与拟合的各点与椭圆的几何距离的平方和最小时,即可得到最小二乘意义下的椭圆拟合参数最优解,得到:

$$[0079] \quad \frac{\partial F(a,x)}{\partial A} = \frac{\partial F(a,x)}{\partial B} = \frac{\partial F(a,x)}{\partial C} = \frac{\partial F(a,x)}{\partial D} = \frac{\partial F(a,x)}{\partial E} = \frac{\partial F(a,x)}{\partial F} = 0$$

[0080] 写成矩阵形式如下:

$$[0081] \quad D \cdot a = 0$$

[0082] 展开即为:

$$[0083] \quad \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3y_3 & y_3^2 & x_3 & y_3 & 1 \\ \dots & \dots & & & & \\ x_n^2 & x_ny_n & y_n^2 & x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0084] 该方程可写成广义特征值问题的形式:

$$[0085] \quad D^T D a = \lambda C a$$

[0086] 其中, $\lambda$ 为特征值,C为约束矩阵,由于椭圆方程存在以下关系:

$$[0087] \quad A^2 + \frac{1}{2}B^2 + C^2 = 1$$

[0088] 则C有如下形式:

$$[0089] \quad c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

[0090] 求解以上方程,可得六个特征值 $\lambda$ ,其中仅有唯一的 $\lambda \in \mathbb{R}^+$ ,及其对应的特征值向量 $a$ 为方程的解,此时 $a$ 中的元素即为最优椭圆参数值,通过解析几何中椭圆一般方程与椭圆参数的关系,可按以下公式计算椭圆几何参数:

$$[0091] \quad x_e = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2}$$

$$[0092] \quad y_e = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2}$$

$$[0093] \quad a = 2 \sqrt{\frac{-2F}{A+C - \sqrt{B^2 + \left(\frac{A-C}{F}\right)^2}}$$

$$[0094] \quad b = 2 \sqrt{\frac{-2F}{A+C + \sqrt{B^2 + \left(\frac{A-C}{F}\right)^2}}$$

$$[0095] \quad \theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{B}{A-C}$$

[0096] 上述各式中, $x, y$ 为椭圆中心相对坐标;

[0097]  $a, b$ 分别为椭圆的长轴和短轴;

[0098]  $\theta$ 为椭圆长轴与正北方向的夹角。

[0099] 作为优选方案,在HTI垂直裂缝型介质中,正演模拟时与正北方向的夹角为 $0^\circ$ 为裂缝走向,与正北方向的夹角为 $90^\circ$ 时代表裂缝法向。

[0100] 其中,建立裂缝椭圆交互分析视图包括:

[0101] 获取各个方位的任一时间点振幅数据,投影至地震属性数据交汇图;

[0102] 基于地震属性数据交汇图,获取任一入射角的各个方位的振幅数据;

[0103] 将各个方位的振幅数据投影至极坐标;

[0104] 基于椭圆方程的拟合,获取裂缝的长短轴指示方向。

[0105] 其中,获取如图2所示的各个方位的某时间点振幅数据,投影到AVAz交汇视图,再通过AVAz交汇视图获取某入射角(图中范围是 $0-30^\circ$ )各个方位的振幅数据,再将各个方位的振幅数据投影至极坐标,利用椭圆拟合方法,求取裂缝的长短轴指示方向,沿裂缝方向,振幅随入射角增大而增大;垂直于裂缝方向,振幅随入射角增大而减小,根据HTI介质裂缝

模型的方位定义,与正北方向的夹角为0度且代表裂缝走向,再分析各向异性椭圆视图,裂缝方向指示为长轴,代表该层位各向异性椭圆的长轴平行于裂缝方向,这个结论将应用于对实际数据的成果解释。

[0106] 作为优选方案,地震振幅属性的方位AVAz特征包括实时获取各向异性椭圆方程长轴的方向与裂缝方向的关系和裂缝模型的密度。

[0107] 在实际生产应用的效果表明,正演的解释结论能够为叠前裂缝检测提供有效的理论依据,增强了反演裂缝方位数据的准确性与可信度。

[0108] 实施例

[0109] 图1示出了根据本发明的一个示例性实施例的一种基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟方法的步骤的流程图。

[0110] 如图1所示,本实施例的一种基于HTI介质的方位AVAz的正演模拟方法,包括:

[0111] 建立裂缝型储层的岩石物理模型;

[0112] 基于方位角道集的AVAz特征分析计算;

[0113] 建立裂缝椭圆交互分析视图;

[0114] 基于裂缝椭圆交互分析视图,分析裂缝引起的地震振幅属性的方位AVAz特征。

[0115] 其中,HTI介质反射、透射系数方程完整地表述了该类型介质中平面波反射、透射系数与入射角的关系,但其方程组解析解的表达式十分复杂,很难直接用来分析介质参数对振幅变化的影响。为了明确地表达反射系数、透射系数与弹性常数的关系,利用近似解的方式简化HTI介质P波入射时的AVO方程:

$$R_p(i, \phi) = \frac{1}{2} \frac{\Delta Z}{\bar{Z}} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta \alpha}{\bar{\alpha}} - \left( \frac{2\bar{\beta}}{\bar{\alpha}} \right)^2 \frac{\Delta G}{\bar{G}} + [\Delta \delta + 2 \left( \frac{2\bar{\beta}}{\bar{\alpha}} \right)^2 \Delta \gamma] \cos^2 \phi \right\} \sin^2 i$$

$$+ \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta \alpha}{\bar{\alpha}} + \Delta \varepsilon \cos^4 \phi + \Delta \delta \sin^2 \phi \cos^2 \phi \right) \sin^2 i \tan^2 i$$

[0117] 式中,  $\bar{Z} = \rho \bar{\alpha}$  为垂直方向纵波的阻抗;

[0118]  $\bar{G} = \rho \bar{\beta}^2$  为横波的模量;

[0119]  $\bar{\alpha}$  为界面上下两侧垂向纵波速度的平均值;

[0120]  $\bar{\beta}$  为横波速度的平均值;

[0121]  $\Delta \varepsilon$ 、 $\Delta \gamma$ 、 $\Delta \delta$  均为上下两层各向异性参数差值

[0122]  $\rho$  为密度。

[0123] 图2示出了根据本发明的一个示例性实施例的裂缝型储层的地质模型。

[0124] 如图2所示,建立裂缝型储层的岩石物理模型包括:通过拾取实际井的横波(S波)、纵波(P波)、密度数据和子波数据,结合各向异性参数和分析层段参数,计算任一层段反射系数与子波的褶积,建立裂缝型储层的岩石物理模型,即裂缝型储层的地质模型。

[0125] 其中,通过对正演模拟方位角道集裂缝型储层的交互拾取,获取各个方位的地震属性数据,开发一套分方位、分角度的地震属性数据交汇图,实时显示方位角道集的AVO特征曲线,通过用户在AVO特征曲线的交互拾取,提取各方位某入射角的属性数据,在拟合椭圆上展布。根据叠前各向异性裂缝检测的原理,在HTI介质中,纵波地震资料的AVO梯度和NMO速度等多个参数都随着方位角呈椭圆形变化,这一特点是利用纵波地震资料检测裂缝

的技术基础。对给定平面上的一组样本点,以椭圆方程为模型进行拟合,使某一椭圆方程尽量满足这些数据点,并求出该椭圆方程的各个参数。

[0126] 方位椭圆拟合中,椭圆方程为:

$$[0127] \quad Ax^2+Bxy+Cy^2+Dx+Ey+F=0$$

[0128] 可以定义一点  $(x, y)$  到椭圆的几何距离为:

$$[0129] \quad F(a, x) = a \cdot x = Ax^2+Bxy+Cy^2+Dx+Ey+F$$

[0130] 其中,  $a = [A \ B \ C \ D \ E \ F]^T$ ,  $x = [x^2 \ xy \ y^2 \ x \ y \ 1]^T$ ;

[0131] 当参与拟合的各点与椭圆的几何距离的平方和最小时,即可得到最小二乘意义下的椭圆拟合参数最优解,得到:

$$[0132] \quad \frac{\partial F(a, x)}{\partial A} = \frac{\partial F(a, x)}{\partial B} = \frac{\partial F(a, x)}{\partial C} = \frac{\partial F(a, x)}{\partial D} = \frac{\partial F(a, x)}{\partial E} = \frac{\partial F(a, x)}{\partial F} = 0$$

[0133] 写成矩阵形式如下:

$$[0134] \quad D \cdot a = 0$$

[0135] 展开即为:

$$[0136] \quad \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3y_3 & y_3^2 & x_3 & y_3 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_n^2 & x_ny_n & y_n^2 & x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0137] 该方程可写成广义特征值问题的形式:

$$[0138] \quad D^T D a = \lambda C a$$

[0139] 其中,  $\lambda$  为特征值,  $C$  为约束矩阵, 由于椭圆方程存在以下关系:

$$[0140] \quad A^2 + \frac{1}{2} B^2 + C^2 = 1$$

[0141] 则  $C$  有如下形式:

$$[0142] \quad c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

[0143] 求解以上方程,可得六个特征值  $\lambda$ , 其中仅有唯一的  $\lambda \in R^+$  (此处引用了一篇文献的结论"Andrew Fitzgibbon, Pilu, Robert B. Fisher. Direct Least Square Fitting of Ellipses[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(5): 476-480"中已经证明该广义特性系统只有1个正的特征值, 并且这个特征值对应的特征向量为所求取的椭圆的参数向量), 及其对应的特征值向量  $a$  为方程的解, 此时  $a$  中的元素即为最优椭圆参数值, 通过解析几何中椭圆一般方程与椭圆参数的关系, 可按以下公式计算椭圆几何参数:

$$[0144] \quad x_e = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2}$$

$$[0145] \quad y_e = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2}$$

$$[0146] \quad a = 2 \sqrt{\frac{-2F}{A+C - \sqrt{B^2 + \left(\frac{A-C}{F}\right)^2}}}$$

$$[0147] \quad b = 2 \sqrt{\frac{-2F}{A+C + \sqrt{B^2 + \left(\frac{A-C}{F}\right)^2}}}$$

$$[0148] \quad \theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{B}{A-C}$$

[0149] 上述各式中, x, y为椭圆中心相对坐标;

[0150] a, b分别为椭圆的长轴和短轴;

[0151]  $\theta$ 为椭圆长轴与正北方向的夹角。

[0152] 图3示出了本发明图2的裂缝型储层的地质模型定义的示意图。

[0153] 如图3所示, 在HTI垂直裂缝型介质中, 正演模拟时与正北方向的夹角为 $0^\circ$ 为裂缝走向, 与正北方向的夹角为 $90^\circ$ 时代表裂缝法向。

[0154] 获取上述图2中各个方位的某时间点振幅数据, 投影到AVAZ交汇视图, 再通过AVAZ交汇视图获取某入射角(图中范围是 $0-30^\circ$ )各个方位的振幅数据, 再将各个方位的振幅数据投影到极坐标, 利用椭圆拟合方法, 求取裂缝的长短轴指示方向。

[0155] 图4a、图4b和图4c分别示出了根据本发明的一个示例性实施例的裂缝椭圆交互分析视图。

[0156] 如图4a-图4c所示, 沿裂缝方向, 振幅随入射角增大而增大; 垂直于裂缝方向, 振幅随入射角增大而减小, 根据HTI介质裂缝模型的方位定义, 与正北方向的夹角为 $0$ 度且代表裂缝走向, 再分析各向异性椭圆视图, 裂缝方向指示为长轴, 代表该层位各向异性椭圆的长轴平行于裂缝方向, 这个结论将应用于对实际数据的成果解释。另外,  $10^\circ$ 入射角示例中, 椭圆比率1.092代表了模型定义的裂缝密度, 随着入射角的增大, 椭圆比率变大, 裂缝密度也逐渐增大。

[0157] 其中, 包括井旁地震道合成记录视图、裂缝型储层的岩石物理模型合成记录视图、裂缝模型分方位地震响应模拟视图、以及各向异性椭圆分析视图等, 视图之间建立联动机制, 通过鼠标在层位上的拾取操作, 实时获取各向异性椭圆长轴的方向与裂缝方向的关系以及裂缝模型的密度。

[0158] 以上已经描述了本发明的实施例, 上述说明是示例性的, 并非穷尽性的, 并且也不限于所披露的实施例。在不偏离所说明的实施例的范围和精神的情况下, 对于本技术领域的普通技术人员来说许多修改和变更都是显而易见的。本文中所用术语的选择, 旨在最好地解释实施例的原理、实际应用或对市场中的技术的改进, 或者使本技术领域的其它普通技术人员能理解本文披露的实施例。

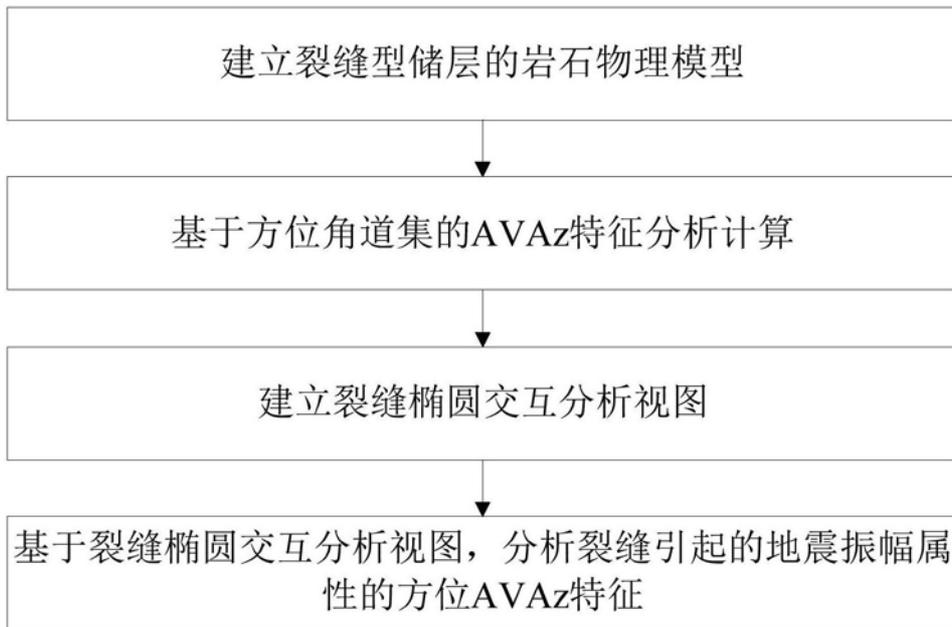


图1

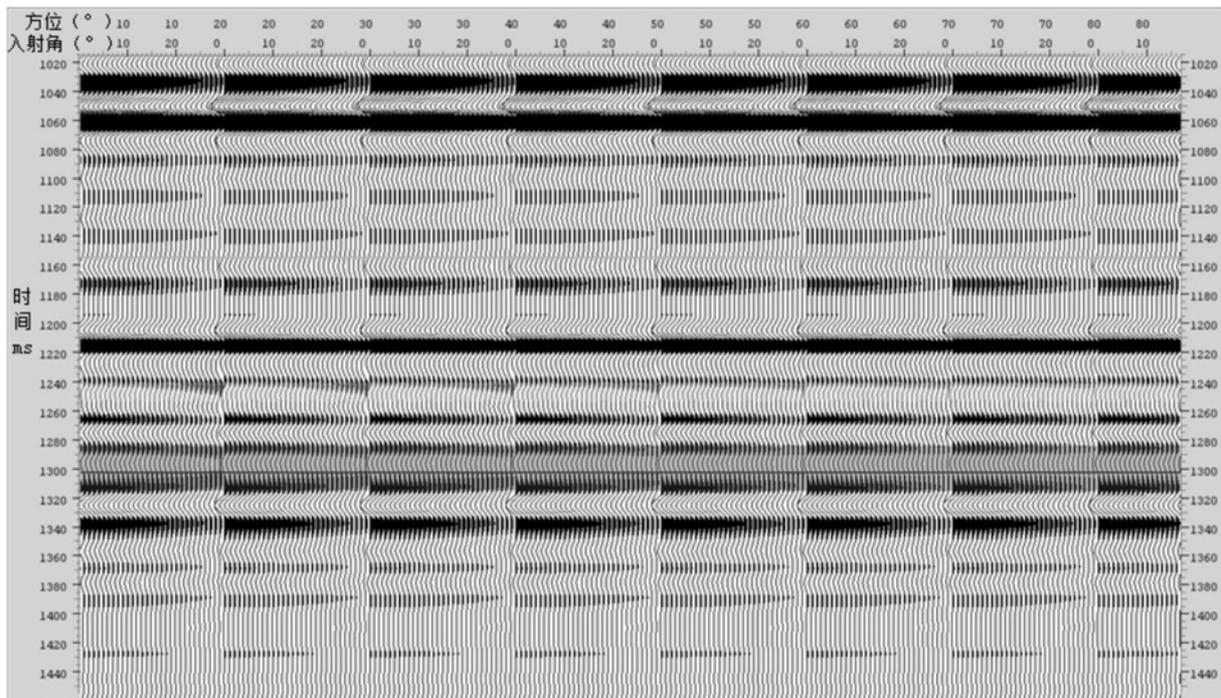


图2

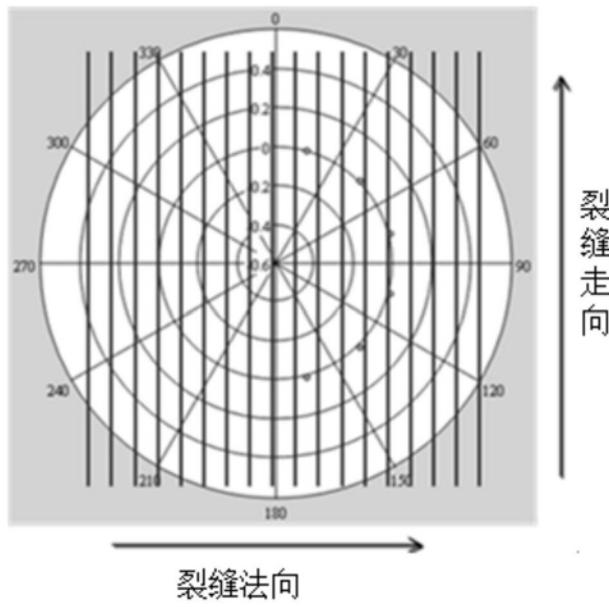


图3

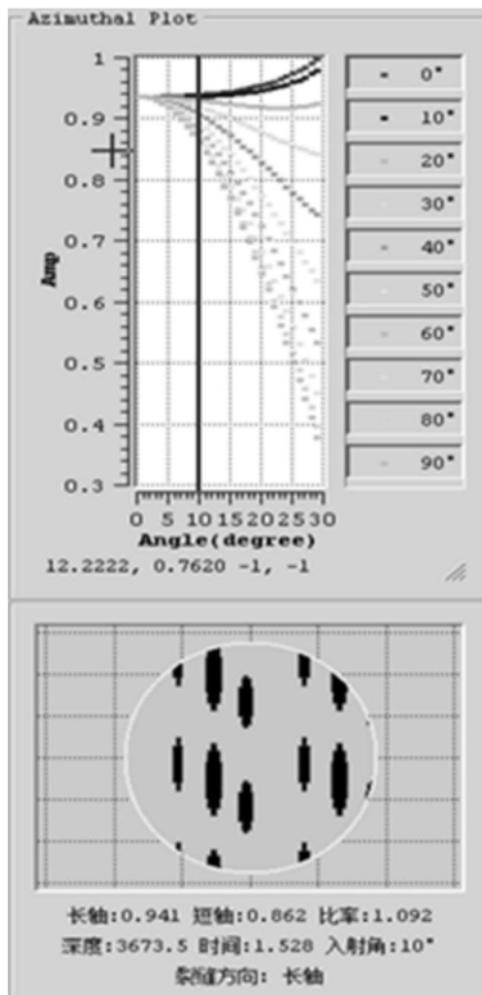


图4a

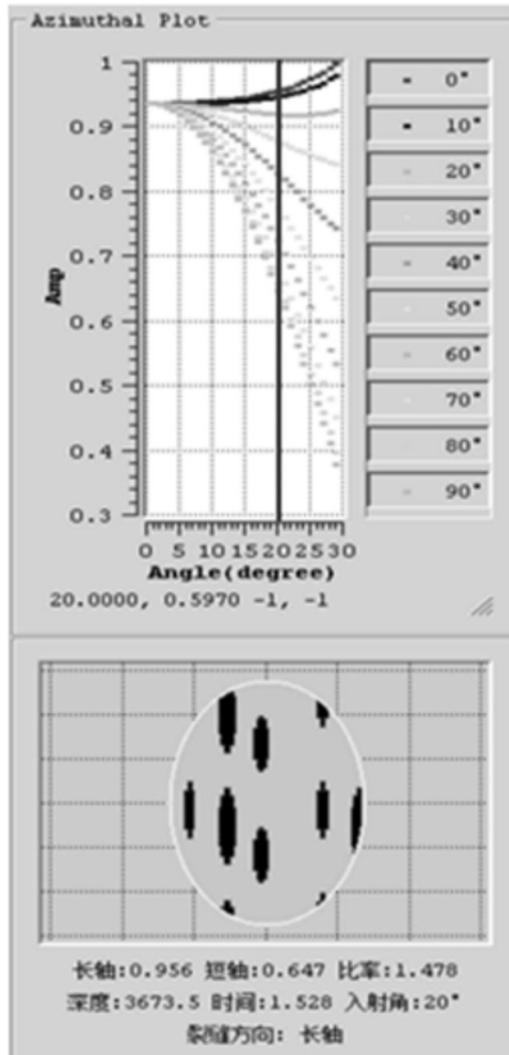


图4b

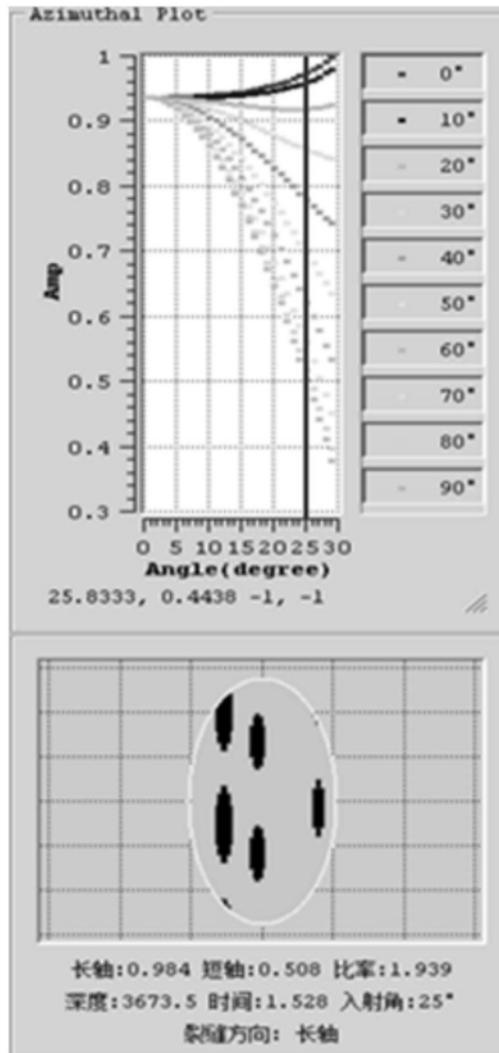


图4c