

裂缝诱导TTI双孔隙介质的纵波偏移成像研究

梁宝军[†]

(东方地球物理公司大港物探处, 天津 300280)

(2013年10月25日收到; 2014年1月27日收到修改稿)

将交错网格高阶有限差分纵横波分离的方法与逆时偏移成像方法相结合, 给出了基于裂缝诱导TTI双孔隙介质模型的纵波逆时偏移成像算法, 并对二维水平层状模型的数据进行偏移成像. 结果表明, 对于裂缝诱导TTI双孔隙介质模型, 常规的基于各向同性背景孔隙岩石速度的偏移方法会导致成像结果出现过偏移现象. 为研究裂缝参数对过偏移程度的影响, 利用Christoffel方程, 对裂缝诱导TTI双孔隙介质模型中的相速度公式进行了推导, 并在此基础上, 分析了裂缝角度和密度参数对介质纵波相速度及成像位置的影响. 结果表明, 在二维情况下, 裂缝极化角增大会减小成像速度与真实速度之间的误差, 从而使得成像结果逐渐接近储层的真实位置; 而裂缝密度的增大则使得速度误差增大, 导致成像结果与真实模型的偏差越来越大.

关键词: 裂缝诱导TTI, 裂缝角度, 裂缝密度, 逆时偏移

PACS: 91.60.-x

DOI: 10.7498/aps.63.119101

1 引言

实际的地下含油气储层可以利用与之对应的理论介质模型来进行描述, 因此, 对于具有非均质性和各向异性特点的碳酸盐岩裂缝性储层而言, 其理论介质模型显然与常规的砂岩油气藏有所不同, 可以用裂缝诱导各向异性裂缝-孔隙介质来进行描述^[1-3]. 关于裂缝诱导各向异性裂缝孔隙介质, 专家学者们已经建立了许多的模型, 根据对裂缝形状的假设, 可以分为两类. 一类是将裂缝假设为具有便士形状的椭球体, 而另一类则是将裂缝等效为无限大且非常松软的地层^[4]. 对于第一种裂缝形态, Hudson提出了含定向裂缝介质有效弹性模量的计算方法, 其前提假设为裂缝呈薄的扁球体(裂缝纵横波很小), 裂缝在介质中呈稀疏定向排列, 且裂缝之间是孤立的^[5-8]; Thomsen在流体压力均衡的条件下, 引入了流体影响因子和各向异性参数, 将Hudson关于扁球体裂缝的理论推广到连通裂缝的情况^[9]. 但是扁球状裂缝的假设毕竟对裂缝的形状进行了一定的限制, 并且其理论都局限于裂缝稀疏分布的情况. 相对而言, 第二种假设

对裂缝的形状和微结构没有任何的限制, 因而可以利用线性滑动理论来对裂缝孔隙介质的等效弹性模量进行描述^[10,11]. 基于此, Gurevich在封闭条件下, 给出了裂缝诱导VTI(Transversely Isotropy With A Vertical Axis of Symmetry)双孔隙模型的弹性模量表达式, 模型中裂缝网络被等效为水平定向排列的单组裂缝^[4]; 杜启振等则建立了裂缝诱导HTI(Transversely Isotropy With A Horizontal Axis of Symmetry)双孔隙介质模型, 并总结了地震波在该介质中的波场传播特征^[12]; 在此基础上, 孔丽云等进一步分析了裂缝弱度、裂缝孔隙度、裂缝渗透率等裂缝参数对诱导HTI双孔隙介质模型波场传播特征的影响^[13]. 这些模型都能够为实际的碳酸盐岩裂缝性储层的勘探开发提供相应的理论依据, 但是仍然存在一定的局限性. 一方面, 这些模型仅仅考虑了裂缝为水平或垂直的情况, 而在实际的裂缝性储层中, 裂缝往往是倾斜的, 与水平或者垂直方向存在一定的夹角; 另外, 这些模型中所采用的裂缝参数在实际中并不容易观测得到. 因此, 对于碳酸盐岩裂缝性储层的等效介质模型, 还需要进一步考虑角度的因素, 并将现有的裂缝物理量与实际的裂缝储层物性参数相结合, 从而建立更

[†] 通讯作者. E-mail: liangbaojun@sohu.com

普遍的使用范围更广的裂缝诱导各向异性双孔隙介质模型.

地震偏移处理又称为偏移归位处理、地震成像处理或地震波场延拓处理,它是令反射波归位,绕射波收敛,干涉带自动分解,从而得到地下真实地质构造的过程^[14]. 偏移方法分为时间域和深度域两类. 时间偏移方法是最早出现的偏移方法,对于地下介质只存在垂向变速的地层,该方法可以得到较好的偏移效果;但对于复杂地表和复杂地质条件的区域,时间偏移成像往往得不到精确的地下构造形态,因此,适应于复杂构造成像的叠前深度偏移得到了发展,并成为解决复杂构造成像的有效工具^[15]. 常见的深度偏移方法主要有: Kirchhoff 偏移、单程波偏移和逆时偏移等. 20世纪90年代以前,叠前深度偏移技术研究基本上是针对 Kirchhoff 积分法. Kirchhoff 偏移方法计算灵活,没有角度的限制,但是受射线追踪方法的制约,所以不能解决波传播过程中的多路径问题;而单程波偏移方法则能够自动解决多路径的问题,但又存在倾角的限制. 相比之下,逆时偏移成像方法(RTM, Reverse Time Migration)允许波沿各个方向传播,对地下介质没有倾角限制,偏移精度较高,并且适用于速度任意变化的模型^[16]. 逆时偏移的思想最早是1983年Whitmore在美国Dallas召开的第53届SEG年会上提出的^[17]. 此后 McMechan, Baysal, Loewenthalan 等分别从不同角度对逆时偏移的原理和应用做了详细的论述,并描述了它高精度全倾角的成像能力^[18-20]. 1986年,Chang 等在对二维垂直地震剖面(VSP)共炮点道集数据进行偏移时首次将逆时偏移引入到弹性波场中,提出激发时间成像条件(Excitation-time Imaging Condition)的概念,并实现了叠前逆时偏移^[21]. 2000年,张秉铭等推导出适用于各向异性介质的多分量联合的逆时偏移算子^[22]. 张会星从弹性波动方程出发,推导了二维各向同性介质情况下弹性波逆时传播的高阶差分格式,实现了弹性波在数值空间中的逆时延拓^[23]. 2009年杜启振将弹性波多分量叠前RTM应用于横向各向同性介质^[24].

本文首先给出了裂缝诱导TTI双孔隙介质模型的波动方程;然后将交错网格高阶有限差分纵横波分离的方法与逆时偏移成像方法相结合,对二维水平层状模型的纵波数据进行偏移成像;为研究裂缝参数对目的层下移程度的影响,利用Christoffel方程,对封闭条件下的裂缝诱导TTI双孔隙介质模型中的相速度公式进行了推导,并在此基础上,分

析了裂缝角度和密度参数对介质纵波相速度及成像位置的影响.

2 裂缝诱导TTI双孔隙介质模型的波动方程

将一组对称轴为任意倾斜方向的裂缝系统嵌入到含有孔隙的各向同性背景岩石中,所等效形成的裂缝性储层就是裂缝诱导TTI(具有倾斜同相轴的横向各向同性)双孔隙介质模型(如图1所示). 其中,基质孔隙系统的孔隙度大,渗透率低,具有高孔低渗的特点,是模型中流体的主要储集空间;裂缝系统则恰好相反,孔隙度小渗透率高,具有低孔高渗的特点,是模型中流体的主要渗流通道. 两套孔隙系统的都是由体积模量为 K_g ,剪切模量为 μ_g ,密度为 ρ_g 的固体颗粒所组成,被体积模量和密度分别为 K_f 和 ρ_f 的同一种流体所饱和;其体积百分比、孔隙度分别为 v_b, φ_b 和 v_c, φ_c . 另外,对于裂缝系统,其平均宽度为 b_c ,垂直裂缝面方向的线密度为 ρ_c . 需要指出的是,两套系统的孔隙度指的是两套系统各自的孔隙空间与各自体积空间的比值;而其体积百分比则是单套系统各自的体积空间与模型总体积的比.

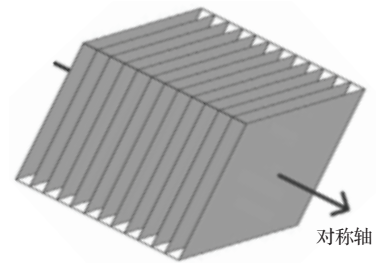


图1 裂缝诱导TTI双孔隙介质模型示意图

对于裂缝系统,其孔隙度存在如下假设:

$$\varphi_c \rightarrow 1. \tag{1}$$

此时,裂缝系统就等价于实际储层中的裂缝,而裂缝系统体积百分比就相当于实际储层中的裂缝密度(单位体积内所包含的实际裂缝体积).

在(1)式的假设条件下,图1所示的裂缝诱导TTI双孔隙介质模型的总孔隙度和密度可以分别表示为

$$\varphi = (1 - v_c) \varphi_b + v_c, \tag{2}$$

$$\rho = (1 - \varphi) \rho_g + \varphi \rho_f. \tag{3}$$

基于上述模型参数的说明及假设条件, 根据线性滑动理论引入裂缝弱度参数, 利用 Bond 坐标变换公式, 给出裂缝诱导 TTI 双孔隙介质的波动方程为

$$\mathbf{L}^{\text{sT}} \mathbf{C} \mathbf{L}^{\text{s}} \mathbf{u} = \rho \ddot{\mathbf{u}}, \quad (4)$$

其中, \mathbf{u} 为位移向量, \mathbf{L}^{s} 是空间微分算子矩阵, \mathbf{C} 为刚度系数矩阵, 其表达式分别为

$$\mathbf{u} = [u_x, u_y, u_z]^{\text{T}}, \quad (5)$$

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 & 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \\ 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \\ 0 & 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \end{bmatrix}^{\text{T}}, \quad (6)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中, 刚度系数各分量的确定是上述波动方程推导的核心, 其具体推导过程如下.

第一步 背景孔隙岩石的弹性模量.

根据 Krief 等的经验公式, 背景孔隙岩石固体骨架的弹性模量与固体颗粒的弹性模量之间存在如下的关系 [25]:

$$\frac{K_b}{K_g} = \frac{\mu_b}{\mu_g} = (1 - \varphi_b)^{\frac{3}{1-\varphi_b}}. \quad (8)$$

因此, 背景岩石的刚度系数矩阵为

$$\mathbf{C}_b = \begin{pmatrix} L_b & \lambda_b & \lambda_b & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_b & L_b & \lambda_b & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_b & \lambda_b & L_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_b \end{pmatrix}, \quad (9)$$

其中,

$$\lambda_b = K_b - \frac{2}{3}\mu_b, \quad (10)$$

$$L_b = K_b + \frac{4}{3}\mu_b. \quad (11)$$

第二步 本构坐标系中裂缝的弹性模量.

在裂缝诱导 TTI 双孔隙介质模型中, 裂缝被假设为无限大且非常松软的地层. 因此, 模型中裂缝的引入对干燥的裂缝诱导 TTI 双孔隙模型弹性系

数的影响可以通过线性滑动理论来进行描述. 根据线性滑动理论, 裂缝对介质弹性参数的影响可以通过裂缝法向弱度 δ_N 和切向弱度 δ_T 这两个物理量来进行描述, 二者与干燥背景孔隙岩石的弹性模量和裂缝体积百分比之间存在如下关系式 [10]:

$$\delta_N = \frac{4\nu_c \left(K_b + \frac{4}{3}\mu_b \right)^2}{4\nu_c \left(K_b + \frac{4}{3}\mu_b \right)^2 + 3\mu_b \left(K_b + \frac{1}{3}\mu_b \right)}, \quad (12)$$

$$\delta_T = \frac{16\nu_c \left(K_b + \frac{4}{3}\mu_b \right)}{16\nu_c \left(K_b + \frac{4}{3}\mu_b \right) + 9 \left(K_b + \frac{2}{3}\mu_b \right)}. \quad (13)$$

由此, 可以得到本构坐标系下干燥裂缝的等效弱度系数的 \mathbf{C}_{c0} 表达式为 [11]

$$\mathbf{C}_{c0} = \begin{pmatrix} C_{c11}^0 & C_{c12}^0 & C_{c13}^0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{c12}^0 & C_{c22}^0 & C_{c23}^0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{c13}^0 & C_{c23}^0 & C_{c33}^0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{c44}^0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{c55}^0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{c66}^0 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

其中,

$$C_{c11}^0 = C_{c22}^0 = C_{c12}^0 = -\frac{\lambda_b^2}{L_b} \delta_N,$$

$$C_{c13}^0 = C_{c23}^0 = -\lambda_b \delta_N,$$

$$C_{c33}^0 = -L_b \delta_N,$$

$$C_{c44}^0 = C_{c55}^0 = -\mu_b \delta_T,$$

$$C_{c66}^0 = 0. \quad (15)$$

第三步 观测坐标系中裂缝的弹性模量.

利用 Bond 坐标变换, 可以得到具有任意方位角和任意 HTI 极化角的裂缝刚度系数矩阵 \mathbf{C}_c 的表达式为 [26,27]

$$\mathbf{C}_c = \mathbf{M}_\theta \mathbf{M}_\varphi \mathbf{C}_{c0} \mathbf{M}_\varphi^{-1} \mathbf{M}_\theta^{-1}, \quad (16)$$

其中, θ 为裂缝的极化角, φ 为裂缝的方位角, 且有

$$\mathbf{M}_\theta = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & 0 & \sin^2 \theta & 0 & -\sin 2\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin^2 \theta & 0 & \cos^2 \theta & 0 & \sin 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ \frac{1}{2} \sin 2\theta & 0 & -\frac{1}{2} \sin 2\theta & 0 & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$M_\phi = \begin{bmatrix} \cos^2 \phi & \sin^2 \phi & 0 & 0 & 0 & \sin 2\phi \\ \sin^2 \phi & \cos^2 \phi & 0 & 0 & 0 & -\sin 2\phi \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ -\frac{1}{2} \sin 2\phi & \frac{1}{2} \sin 2\phi & 0 & 0 & 0 & \cos 2\phi \end{bmatrix}. \quad (18)$$

第四步 裂缝诱导TTI双孔隙介质的弹性模量.

根据线性滑动理论, 裂缝诱导TTI双孔隙介质的弹性系数矩阵可以写为^[11]

$$C = C_b + C_c. \quad (19)$$

将 C_b 的表达式(9)和 C_c 的表达式(16)代入上式, 就可以得到裂缝诱导TTI双孔隙介质模型的弹性系数矩阵, 其各分量具体表达式为

$$\begin{aligned} C_{11} &= (\cos^2 \phi \cos^2 \theta C_{c11}^0 + \sin^2 \phi C_{c12}^0 + \cos^2 \phi \sin^2 \theta C_{c13}^0) \cos^2 \phi \cos^2 \theta + (\cos^2 \phi \cos^2 \theta C_{c13}^0 + \sin^2 \phi C_{c23}^0 \\ &\quad + \cos^2 \phi \sin^2 \theta C_{c33}^0) \cos^2 \phi \sin^2 \theta + (\cos^2 \phi \cos^2 \theta C_{c12}^0 + \sin^2 \phi C_{c22}^0 + \cos^2 \phi \sin^2 \theta C_{c23}^0) \sin^2 \phi \\ &\quad + (\sin 2\phi \sin^2 \theta C_{c44}^0 + \sin 2\phi \cos^2 \theta C_{c66}^0) \sin 2\phi + \cos^4 \phi \sin^2 2\theta C_{c55}^0 + L_b, \\ C_{12} &= (\cos^2 \phi \cos^2 \theta C_{c11}^0 + \sin^2 \phi C_{c12}^0 + \cos^2 \phi \sin^2 \theta C_{c13}^0) \sin^2 \phi \cos^2 \theta + (\cos^2 \phi \cos^2 \theta C_{c13}^0 + \sin^2 \phi C_{c23}^0 \\ &\quad + \cos^2 \phi \sin^2 \theta C_{c33}^0) \sin^2 \phi \sin^2 \theta + (\cos^2 \phi \cos^2 \theta C_{c12}^0 + \sin^2 \phi C_{c22}^0 + \cos^2 \phi \sin^2 \theta C_{c23}^0) \cos^2 \phi \\ &\quad + (\sin 2\phi \sin^2 \theta C_{c44}^0 + \sin 2\phi \cos^2 \theta C_{c66}^0) \sin 2\phi + \sin^2 \phi \cos^2 \phi \sin^2 2\theta C_{c55}^0 + \lambda_b, \\ C_{13} &= (\cos^2 \phi \cos^2 \theta C_{c11}^0 + \sin^2 \phi C_{c12}^0 + \cos^2 \phi \sin^2 \theta C_{c13}^0) \sin^2 \theta + (\cos^2 \phi \cos^2 \theta C_{c13}^0 + \sin^2 \phi C_{c23}^0 \\ &\quad + \cos^2 \phi \sin^2 \theta C_{c33}^0) \cos^2 \theta - \cos^2 \phi \sin^2 2\theta C_{c55}^0 + \lambda_b, \\ C_{14} &= 0.5(\cos^2 \phi \cos^2 \theta C_{c11}^0 + \sin^2 \phi C_{c12}^0 + \cos^2 \phi \sin^2 \theta C_{c13}^0) \sin \phi \sin 2\theta - 0.5(\cos^2 \phi \cos^2 \theta C_{c13}^0 \\ &\quad + \sin^2 \phi C_{c23}^0 + \cos^2 \phi \sin^2 \theta C_{c33}^0) \sin \phi \sin 2\theta + (\sin 2\phi \sin \theta \cos \theta C_{c44}^0 - \sin 2\phi \sin \theta \cos \theta C_{c66}^0) \cos \phi \\ &\quad - \sin \phi \cos^2 \phi \sin 2\theta (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) C_{c55}^0, \\ C_{15} &= 0.5(\cos^2 \phi \cos^2 \theta C_{c11}^0 + \sin^2 \phi C_{c12}^0 + \cos^2 \phi \sin^2 \theta C_{c13}^0) \cos \phi \sin 2\theta - 0.5(\cos^2 \phi \cos^2 \theta C_{c13}^0 \\ &\quad + \sin^2 \phi C_{c23}^0 + \cos^2 \phi \sin^2 \theta C_{c33}^0) \cos \phi \sin 2\theta - (\sin 2\phi \sin \theta \cos \theta C_{c44}^0 - \sin 2\phi \sin \theta \cos \theta C_{c66}^0) \sin \phi \\ &\quad - \cos^3 \phi \sin 2\theta (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) C_{c55}^0, \\ C_{16} &= 0.5(\cos^2 \phi \cos^2 \theta C_{c11}^0 + \sin^2 \phi C_{c12}^0 + \cos^2 \phi \sin^2 \theta C_{c13}^0) \sin 2\phi \cos^2 \theta + 0.5(\cos^2 \phi \cos^2 \theta C_{c13}^0 \\ &\quad + \sin^2 \phi C_{c23}^0 + \cos^2 \phi \sin^2 \theta C_{c33}^0) \sin 2\phi \sin^2 \theta - 0.5(\cos^2 \phi \cos^2 \theta C_{c12}^0 + \sin^2 \phi C_{c22}^0 \\ &\quad + \cos^2 \phi \sin^2 \theta C_{c23}^0) \sin 2\phi - (\sin 2\phi \sin^2 \theta C_{c44}^0 + \sin 2\phi \cos^2 \theta C_{c66}^0) \cos 2\phi \\ &\quad + 0.5 \sin 2\phi \cos^2 \phi \sin^2 2\theta C_{c55}^0, \\ C_{22} &= (\sin^2 \phi \cos^2 \theta C_{c11}^0 + \cos^2 \phi C_{c12}^0 + \sin^2 \phi \sin^2 \theta C_{c13}^0) \sin^2 \phi \cos^2 \theta + (\sin^2 \phi \cos^2 \theta C_{c13}^0 + \cos^2 \phi C_{c23}^0 \\ &\quad + \sin^2 \phi \sin^2 \theta C_{c33}^0) \sin^2 \phi \sin^2 \theta + (\sin^2 \phi \cos^2 \theta C_{c12}^0 + \cos^2 \phi C_{c22}^0 + \sin^2 \phi \sin^2 \theta C_{c23}^0) \cos^2 \phi \\ &\quad + (\sin 2\phi \sin^2 \theta C_{c44}^0 + \sin 2\phi \cos^2 \theta C_{c66}^0) \sin 2\phi + \sin^4 \phi \sin^2 2\theta C_{c55}^0 + L_b, \\ C_{23} &= (\sin^2 \phi \cos^2 \theta C_{c11}^0 + \cos^2 \phi C_{c12}^0 + \sin^2 \phi \sin^2 \theta C_{c13}^0) \sin^2 \theta + (\sin^2 \phi \cos^2 \theta C_{c13}^0 + \cos^2 \phi C_{c23}^0 \\ &\quad + \sin^2 \phi \sin^2 \theta C_{c33}^0) \cos^2 \theta - \sin^2 \phi \sin^2 2\theta C_{c55}^0 + \lambda_b, \\ C_{24} &= 0.5(\sin^2 \phi \cos^2 \theta C_{c11}^0 + \cos^2 \phi C_{c12}^0 + \sin^2 \phi \sin^2 \theta C_{c13}^0) \sin \phi \sin 2\theta - 0.5(\sin^2 \phi \cos^2 \theta C_{c13}^0 \\ &\quad + \cos^2 \phi C_{c23}^0 + \sin^2 \phi \sin^2 \theta C_{c33}^0) \sin \phi \sin 2\theta + (-\sin 2\phi \sin \theta \cos \theta C_{c44}^0 + \sin 2\phi \sin \theta \cos \theta C_{c66}^0) \cos \phi \\ &\quad - \sin^3 \phi \sin 2\theta (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) C_{c55}^0, \\ C_{25} &= 0.5(\sin^2 \phi \cos^2 \theta C_{c11}^0 + \cos^2 \phi C_{c12}^0 + \sin^2 \phi \sin^2 \theta C_{c13}^0) \cos \phi \sin 2\theta - 0.5(\sin^2 \phi \cos^2 \theta C_{c13}^0 \\ &\quad + \cos^2 \phi C_{c23}^0 + \sin^2 \phi \sin^2 \theta C_{c33}^0) \cos \phi \sin 2\theta + (\sin 2\phi \sin \theta \cos \theta C_{c44}^0 - \sin 2\phi \sin \theta \cos \theta C_{c66}^0) \sin \phi \\ &\quad - \sin^2 \phi \cos \phi \sin 2\theta (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) C_{c55}^0, \\ C_{26} &= 0.5(\sin^2 \phi \cos^2 \theta C_{c11}^0 + \cos^2 \phi C_{c12}^0 + \sin^2 \phi \sin^2 \theta C_{c13}^0) \sin 2\phi \cos^2 \theta + 0.5(\sin^2 \phi \cos^2 \theta C_{c13}^0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \cos^2 \phi C_{c23}^0 + \sin^2 \phi \sin^2 \theta C_{c33}^0) \sin 2\phi \sin^2 \theta - 0.5(\sin^2 \phi \cos^2 \theta C_{c12}^0 + \cos^2 \phi C_{c22}^0 \\
 & + \sin^2 \phi \sin^2 \theta C_{c23}^0) \sin 2\phi + (\sin 2\phi \sin^2 \theta C_{c44}^0 + \sin 2\phi \cos^2 \theta C_{c66}^0) \cos 2\phi \\
 & + 0.5 \sin 2\phi \sin^2 \phi \sin^2 2\theta C_{c55}^0, \\
 C_{33} & = (\sin^2 \theta C_{c11}^0 + \cos^2 \theta C_{c13}^0) \sin^2 \theta + (\sin^2 \theta C_{c13}^0 + \cos^2 \theta C_{c33}^0) \cos^2 \theta + \sin^2 2\theta C_{c55}^0 + L_b, \\
 C_{34} & = 0.5(\sin^2 \theta C_{c11}^0 + \cos^2 \theta C_{c13}^0) \sin \phi \sin 2\theta - 0.5(\sin^2 \theta C_{c13}^0 + \cos^2 \theta C_{c33}^0) \sin \phi \sin 2\theta \\
 & + \sin \phi \sin 2\theta (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) C_{c55}^0, \\
 C_{35} & = 0.5(\sin^2 \theta C_{c11}^0 + \cos^2 \theta C_{c13}^0) \cos \phi \sin 2\theta - 0.5(\sin^2 \theta C_{c13}^0 + \cos^2 \theta C_{c33}^0) \cos \phi \sin 2\theta \\
 & + \cos \phi \sin 2\theta (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) C_{c55}^0, \\
 C_{36} & = 0.5(\sin^2 \theta C_{c11}^0 + \cos^2 \theta C_{c13}^0) \sin 2\phi \cos^2 \theta + 0.5(\sin^2 \theta C_{c13}^0 + \cos^2 \theta C_{c33}^0) \sin 2\phi \sin^2 \theta \\
 & - 0.5(\sin^2 \theta C_{c12}^0 + \cos^2 \theta C_{c23}^0) \sin 2\phi - 0.5 \sin 2\phi \sin^2 2\theta C_{c55}^0, \\
 C_{44} & = 0.25(\sin \phi \sin 2\theta C_{c11}^0 - \sin \phi \sin 2\theta C_{c13}^0) \sin \phi \sin 2\theta - 0.25(\sin \phi \sin 2\theta C_{c13}^0 - \sin \phi \sin 2\theta C_{c33}^0) \\
 & \times \sin \phi \sin 2\theta + (\cos \phi \cos^2 \theta C_{c44}^0 + \cos \phi \sin^2 \theta C_{c66}^0) \cos \phi + \sin^2 \phi (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)^2 C_{c55}^0 + \mu_b, \\
 C_{45} & = 0.25(\sin \phi \sin 2\theta C_{c11}^0 - \sin \phi \sin 2\theta C_{c13}^0) \cos \phi \sin 2\theta - 0.25(\sin \phi \sin 2\theta C_{c13}^0 - \sin \phi \sin 2\theta C_{c33}^0) \\
 & \times \cos \phi \sin 2\theta - (\cos \phi \cos^2 \theta C_{c44}^0 + \cos \phi \sin^2 \theta C_{c66}^0) \sin \phi + \sin \phi \cos \phi (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)^2 C_{c55}^0, \\
 C_{46} & = 0.25(\sin \phi \sin 2\theta C_{c11}^0 - \sin \phi \sin 2\theta C_{c13}^0) \sin 2\phi \cos^2 \theta + 0.25(\sin \phi \sin 2\theta C_{c13}^0 - \sin \phi \sin 2\theta C_{c33}^0) \\
 & \times \sin 2\phi \sin^2 \theta - 0.25(\sin \phi \sin 2\theta C_{c12}^0 - \sin \phi \sin 2\theta C_{c23}^0) \sin 2\phi + (-\cos \phi \sin \theta \cos \theta C_{c44}^0 \\
 & + \cos \phi \sin \theta \cos \theta C_{c66}^0) \cos 2\phi - 0.5 \sin \phi \sin 2\phi (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \sin 2\theta C_{c55}^0, \\
 C_{55} & = 0.25(\cos \phi \sin 2\theta C_{c11}^0 - \cos \phi \sin 2\theta C_{c13}^0) \cos \phi \sin 2\theta - 0.25(\cos \phi \sin 2\theta C_{c13}^0 - \cos \phi \sin 2\theta C_{c33}^0) \\
 & \times \cos \phi \sin 2\theta + (\sin \phi \cos^2 \theta C_{c44}^0 + \sin \phi \sin^2 \theta C_{c66}^0) \sin \phi + \cos^2 \phi (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)^2 C_{c55}^0 + \mu_b, \\
 C_{56} & = 0.25(\cos \phi \sin 2\theta C_{c11}^0 - \cos \phi \sin 2\theta C_{c13}^0) \sin 2\phi \cos^2 \theta + 0.25(\cos \phi \sin 2\theta C_{c13}^0 - \cos \phi \sin 2\theta C_{c33}^0) \\
 & \times \sin 2\phi \sin^2 \theta - 0.25(\cos \phi \sin 2\theta C_{c12}^0 - \cos \phi \sin 2\theta C_{c23}^0) \sin 2\phi + (\sin \phi \sin \theta \cos \theta C_{c44}^0 \\
 & - \sin \phi \sin \theta \cos \theta C_{c66}^0) \cos 2\phi - 0.5 \cos \phi \sin 2\phi (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \sin 2\theta C_{c55}^0, \\
 C_{66} & = 0.25(\sin 2\phi \cos^2 \theta C_{c11}^0 - \sin 2\phi C_{c12}^0 + \sin 2\phi \sin^2 \theta C_{c13}^0) \sin 2\phi \cos^2 \theta + 0.25(\sin 2\phi \cos^2 \theta C_{c13}^0 \\
 & - \sin 2\phi C_{c23}^0 + \sin 2\phi \sin^2 \theta C_{c33}^0) \sin 2\phi \sin^2 \theta + 0.25(\sin 2\phi \cos^2 \theta C_{c12}^0 - \sin 2\phi C_{c22}^0 \\
 & + \sin 2\phi \sin^2 \theta C_{c23}^0) \sin 2\phi + (\cos 2\phi \sin^2 \theta C_{c44}^0 + \cos 2\phi \cos^2 \theta C_{c66}^0) \cos 2\phi \\
 & + 0.25 \sin^2 2\phi \sin^2 2\theta C_{c55}^0 + \mu_b.
 \end{aligned}$$

从上述的推导过程中可以看出, 对于裂缝诱导 TTI 双孔隙介质的描述, 除了需要固体颗粒的弹性模量和背景孔隙岩石的孔隙度参数外, 还需要与裂缝相关的裂缝体积百分比和角度信息。

3 纵波逆时偏移成像算法的实现

基于共炮点道集记录的纵波叠前逆时深度偏移方法是将弹性波逆时偏移与纵横波波场分离方法相结合. 此处, 在成像时间计算的过程中, 对基于弹性波方程的各旅行时采样点的数据进行纵横波波场分离, 得到纵波成像时间; 在逆时外推过程

中, 采用已知的纵波数据作为边值条件对弹性波波场进行外推, 并对各旅行时采样点的数据再次分离得到外推的纵波波场; 在每一步外推时, 依据互相关成像条件仅提取外推的纵波波场, 并最终得到该炮的纵波偏移结果, 并最终得到所有炮叠加之后的纵波偏移剖面。

在二维情况下, 采用交错网格高阶有限差分数值模拟方法对图 2 所示的水平层状模型进行纵波逆时偏移成像. 特别的, 对于纵横波波场分离技术, 本文所使用的是基于旋度场和散度场的交错网格高阶有限差分的纵横波波场分离方法^[28]. 首先, 根据场的理论, 任何一个矢量场都可定义为一个标量

场的散度和一个矢量场的旋度相加的结果, 因此, 质点速度 $v = (v_x, v_z)$ 可以写为如下表达式形式:

$$v = (\nabla\psi_p + \nabla \times \psi_s), \quad (20)$$

其中, ψ_p 和 ψ_s 分别代表速度场的标量位和矢量位, 即纵波和横波的位移位. 其次, 对于上述速度场分别求其散度和旋度, 就可以得到速度矢量的无旋场与无散场, 也即纵波波场 v_p 与横波波场 v_s . 其表达式分别为

$$v_p = \nabla \cdot v = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z}, \quad (21)$$

$$v_s = \nabla \times v = \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x}. \quad (22)$$

最后, 基于高阶交错网格有限差分法对上述表达式进行空间离散.

图 2 所示模型大小为 $2000 \text{ m} \times 2000 \text{ m}$, 介质 I 和介质 III 为各向同性完全弹性介质, 中间层介质 II 为封闭条件下的裂缝诱导 TTI 双孔隙介质; 两个地层分界面分别位于深度为 800 m 和 1300 m 处. 第一层纵波速度为 4482 m/s , 横波速度为 2587 m/s , 密度为 2.5 g/cm^3 ; 第二层背景层岩石颗粒为灰

岩, 背景孔隙岩石和裂缝的物性参数分别如表 1 和表 2 所示; 第三层为纵波速度为 5300 m/s , 横波速度为 2975 m/s , 密度为 2.75 g/cm^3 [29]. 模拟的野外放炮方式为: 中间放炮两边接收, 时间采样率为 1 ms , 接收道数为 101 道, 最大偏移距为 500 m , 最小偏移距为 0 m , 记录道长为 650 ms , 道间距为 10 m , 炮间距为 20 m , 共 51 炮.

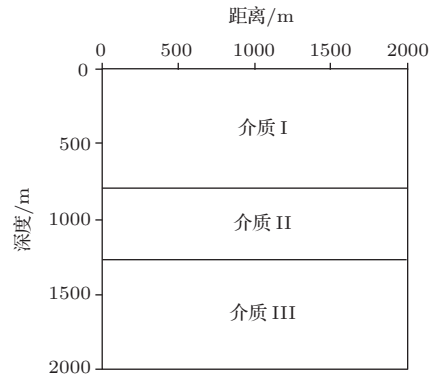


图 2 三层介质模型示意图

表 1 基质孔隙岩石的物性参数

参数	$V_p/(m/s)$	$V_s/(m/s)$	$\rho_g/(kg/m^3)$	$\varphi_p/\%$	k_p/mD	K_f/GPa	$\rho_f/(kg/m^3)$	$\eta/Pa \cdot s$
取值	6220	3386	2790	20	100	2.5	1000	0.001

表 2 不同模型的裂缝参数表

裂缝参数	$v_c/\%$	b_c/mm	$\theta/(\circ)$	$\phi/(\circ)$
参数值	5	5	45	75

首先, 根据上述模型参数, 利用交错网格高阶有限差分法, 采用 PML 边界处理方法, 对水平层状模型进行正演模拟, 并从结果中提取出纵波数据. 图 3(a) 和 (b) 分别为介质在水平和垂直的单炮记录

录, (c) 是得到的纵波数据.

然后, 根据图 3(c) 所提供的纵波数据, 对水平层状模型进行纵波逆时偏移成像. 为了说明裂缝的引入对纵波成像结果的影响, 中间层采用两种速度模型: 速度场 I 是基于裂缝诱导 TTI 双孔隙介质的速度场, 也就是精确的速度场; 速度场 II 是基于干燥背景孔隙岩石的各向同性孔隙介质的弹性波速度场, 相当于偏移速度场大于真实速度场的情况. 下面, 给出纵波逆时偏移成像的实现过程及结果图.

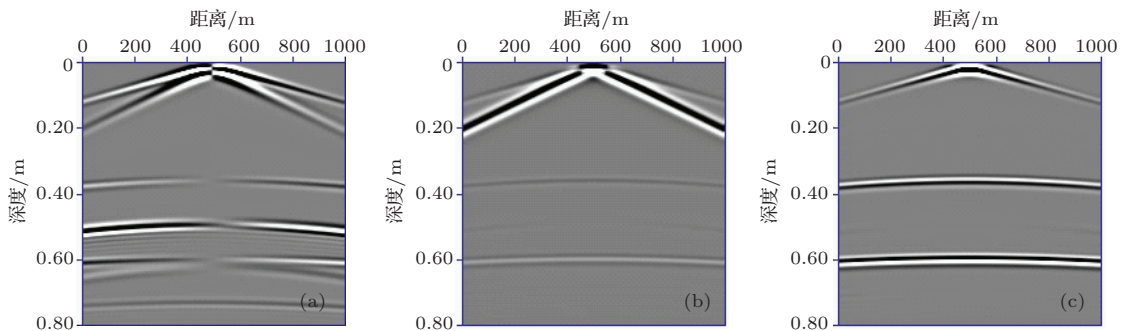


图 3 三层介质模型的合成地震记录 (a) 和 (b) 分别为介质在水平和垂直的单炮记录; (c) 是得到的纵波数据

第一步 根据给定的速度场, 对图 2 所示的水平层状模型进行正演模拟. 对于每一个时间采样点上的波场快照的水平分量和垂直分量, 利用散度场波场分离的方法, 得到该时间点上介质的纵波波场快照.

第二步 将图 3(c) 所提供的地震数据作为初始值, 对模型进行逆时外推. 对每一时间采样点, 同样利用水平分量和垂直分量的波场值得到纵波的波场快照, 并进行记录.

第三步 根据互相关成像条件, 将模型中每一点所对应的正演模拟波场快照和逆时外推波场快照相乘, 并在所有的时间采样点上进行累加, 就得

到介质模型在该点的成像值(图 4(a) 和图 5(a)).

最后, 模型中每一点所对应的所有炮在该点的成像值累加, 就得到整个介质模型的逆时偏移成像结果(图 4(b) 和图 5(b)).

结果表明, 由于速度场 I 与真实介质模型的速度场一致, 偏移结果准确, 水平层状介质模型的偏移成像结果与真实地层一致; 而采用背景孔隙岩石的速度场 II 对模型进行偏移时, 由于偏移速度长大于真实速度场, 所以纵波逆时偏移成像结果中下层界面的位置相对于真实地层而言向下移动了, 及所谓的过偏移现象.

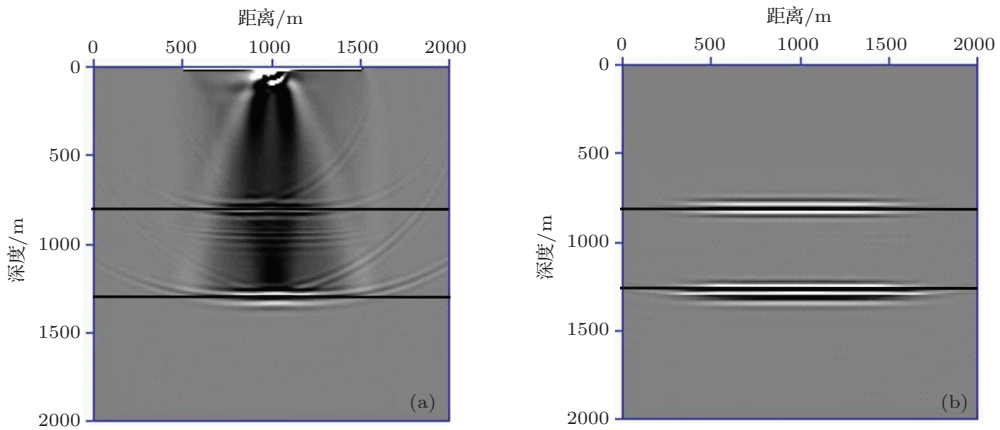


图 4 单炮 (a) 和多炮 (b) 的纵波逆时偏移结果 (速度场 I)

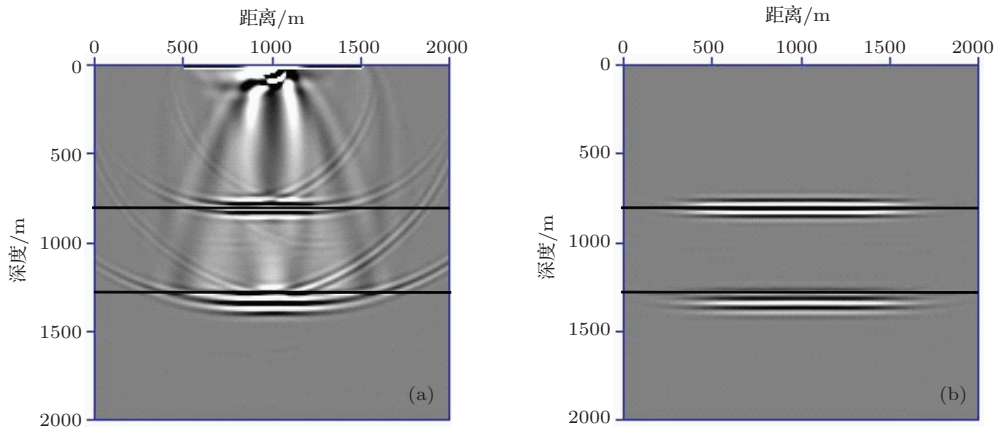


图 5 单炮 (a) 和多炮 (b) 的纵波逆时偏移结果 (速度场 II)

4 裂缝参数对过偏移现象的影响

由于常规的纵波逆时偏移大多是基于各向同性的假设, 因此, 对于裂缝性储层, 常规的偏移结果都会存在上述的过偏移现象. 为了进一步研究裂缝参数对过偏移现象的影响, 对封闭条件下裂缝诱导 TTI 双孔隙介质模型的相速度进行分析.

4.1 相速度表达式

根据裂缝诱导 TTI 双孔隙介质模型的弹性波方程 (4), 对介质的 Christoffel 方程进行推导, 进而得到介质的相速度表达式为 [26]

$$\rho v^2 = 2\sqrt{\frac{-d}{3}} \cos\left(\frac{\beta}{3} + k\frac{2\pi}{3}\right) - \frac{a}{3}, \quad (23)$$

其中,

$$\beta = \frac{-q}{2\sqrt{(-d/3)^3}}, \quad q = 2\left(\frac{a}{3}\right)^3 - \frac{ab}{3} + c, \quad d = -\frac{a^2}{3} + b, \quad a = -(a_{11} + a_{22} + a_{33}),$$

$$b = a_{11}a_{22} + a_{11}a_{33} + a_{22}a_{33} - a_{12}^2 - a_{13}^2 - a_{23}^2, \quad c = a_{11}a_{23}^2 + a_{22}a_{13}^2 + a_{33}a_{12}^2 - a_{11}a_{22}a_{33} - 2a_{12}a_{13}a_{23},$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{22} \\ a_{33} \\ a_{23} \\ a_{13} \\ a_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{66} & C_{55} & 2C_{56} & 2C_{15} & 2C_{16} \\ C_{66} & C_{22} & C_{44} & 2C_{24} & 2C_{46} & 2C_{26} \\ C_{55} & C_{44} & C_{33} & 2C_{34} & 2C_{35} & 2C_{45} \\ C_{56} & C_{24} & C_{34} & C_{23} + C_{44} & C_{36} + C_{45} & C_{25} + C_{46} \\ C_{15} & C_{46} & C_{35} & C_{36} + C_{45} & C_{13} + C_{55} & C_{14} + C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{45} & C_{25} + C_{46} & C_{14} + C_{56} & C_{12} + C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x^2 \\ n_y^2 \\ n_z^2 \\ n_y n_z \\ n_x n_z \\ n_x n_y \end{bmatrix}.$$

上式中, \mathbf{n} 为波的传播方向, $k = 0, 1, 2$. 当 $k = 0$ 时, 方程有最大根, 其实部对应于纵波的相速度; 当 $k = 1, 2$ 时, 方程的两个根的实部则对应着分裂的两种横波的相速度.

4.2 裂缝参数的影响

图 6 给出了垂直入射时裂缝极化角和方位角以及裂缝密度对裂缝诱导 TTI 双孔隙介质模型纵波相速度的影响. 图 6(a) 表明, 垂直入射时, 随着裂缝极化角的增大, 纵波的相速度逐渐增大, 但裂缝方位角对纵波相速度几乎没有影响; 而图 6(b)

则表明, 随着裂缝密度参数(裂缝线密度与裂缝平均宽度的乘积)的增大, 纵波的相速度逐渐减小.

根据上述的分析, 进一步研究裂缝参数对纵波逆时偏移成像结果的影响. 结果表明, 由于裂缝极化角的增大会导致纵波相速度增大, 并且逐渐与背景孔隙岩石相接近, 使得逆时偏移的速度场 II 逐渐接近于真实的速度场, 因此, 成像结果与真实地层之间的偏差越来越小(图 7). 由于裂缝方位角对纵波速度的影响不大, 因此, 逆时偏移结果随着裂缝方位角的增大没有变化(图 8). 而当裂缝体积百分比增大时, 由于裂缝空间增大导致裂缝诱导 TTI 双

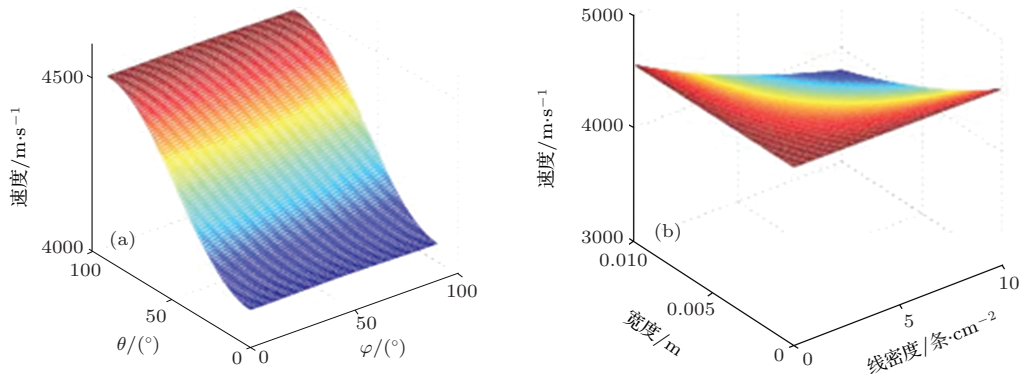


图 6 极化角和方位角 (a) 以及裂缝线密度和平均宽度 (b) 对纵波相速度的影响

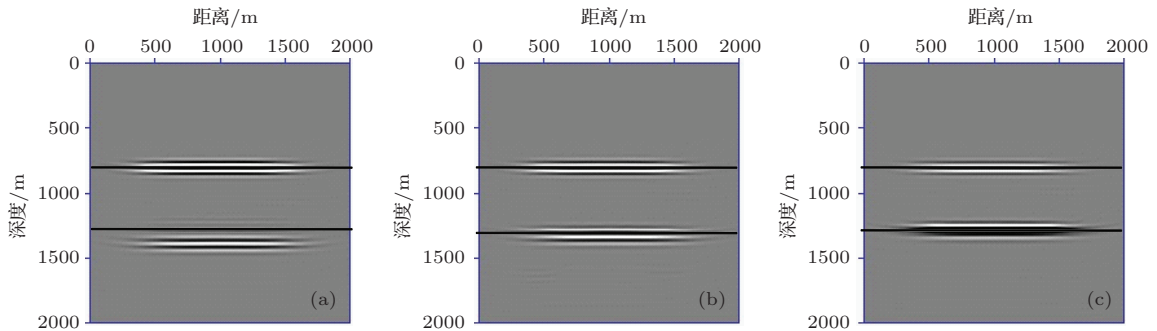


图 7 极化角分别为 15° (a), 45° (b), 75° (c) 时的纵波逆时偏移成像结果

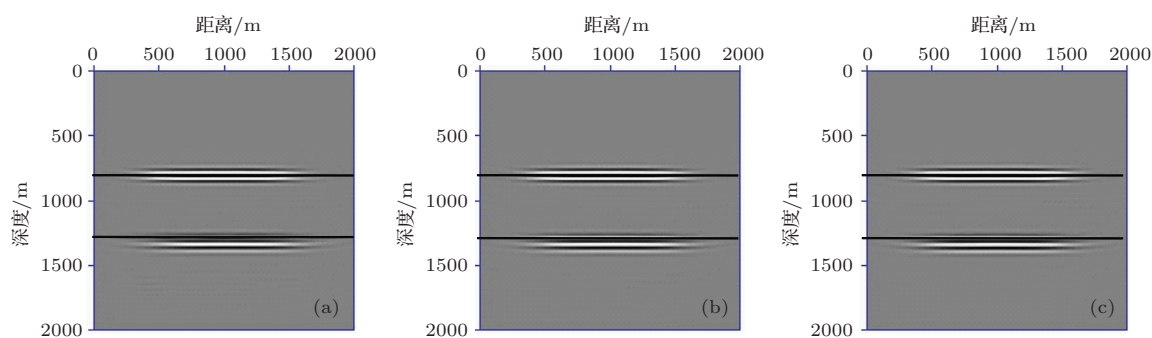


图8 裂缝方位角分别为 15° (a), 45° (b), 75° (c) 时的纵波逆时偏移成像结果

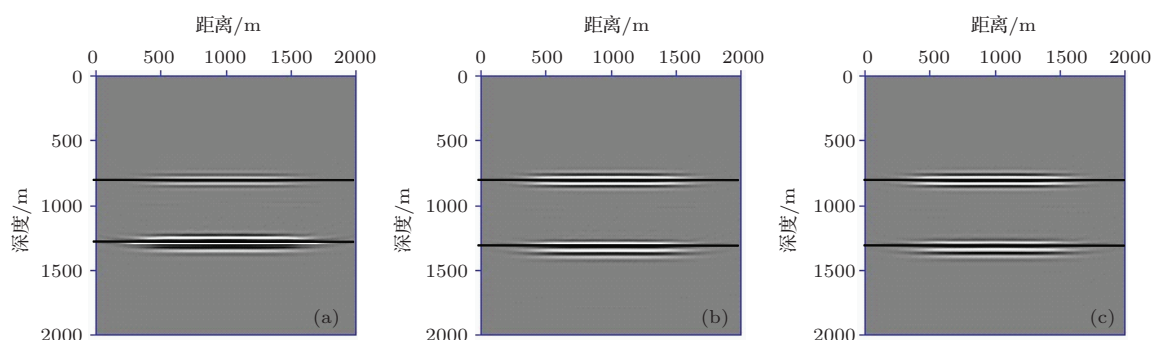


图9 裂缝密度分别为 0.01 (a), 0.05 (b) 和 0.1 (c) 时的纵波逆时偏移成像结果

孔隙介质模型的速度逐渐减小, 从而使得速度场 II 与真实的速度场之间的误差越来越大, 进而导致成像位置相对于真实储层而言进一步先下移动, 过偏移现象越来越明显(图 9)。

5 结 论

基于线性滑动理论及 Bond 坐标变换矩阵, 对封闭条件下的裂缝诱导 TTI 双孔隙介质模型的波动方程进行了推导; 将基于散度场和旋度场的纵横波分离方法与逆时偏移成像方法相结合, 给出了基于裂缝诱导 TTI 双孔隙介质模型的纵波逆时偏移成像算法; 采用交错网格高阶有限差分数值模拟方法, 分别基于裂缝诱导 TTI 双孔隙介质速度模型和各向同性孔隙背景速度模型, 对二维水平层状模型的纵波数据进行偏移成像, 并对结果进行了对比。分析表明, 当采用各向同性背景孔隙岩石的速度对裂缝诱导 TTI 双孔隙介质模型进行纵波逆时偏移成像时, 得到的地层成像位置相对于真实地层会向下移动, 因而对于裂缝性储层, 采用常规的基于各向同性速度模型的偏移方法会使最终的偏移结果产生过偏移现象。而对裂缝参数的分析结果表明, 在二维情况下, 裂缝方位角对偏移结果几乎没有影

响; 裂缝极化角增大会减小成像速度与真实速度之间的误差, 从而使得过偏移程度减小; 而裂缝密度的增大则使得速度误差增大, 导致过偏移现象更为严重。因此, 本文的研究能够为裂缝性储层的实际勘探开发提供重要的理论依据, 同时, 鉴于声波在黏弹性介质中的传播理论已得到广泛关注^[30], 本文的研究结果还可以进一步对黏弹性介质的研究提供相应的理论基础。

参考文献

- [1] Brown R J S, Korringa J 1975 *Geophysics* **40** 608
- [2] Xu S 1998 *International Journal of Solids and Structures* **35** 4685
- [3] Cardona R 2002 *SEG Annual Meeting*
- [4] Gurevich B 2003 *Journal of Applied Geophysics* **54** 203
- [5] Hudson J A 1980 *Overall properties of a cracked solid* (Cambridge University Press) **88** 371
- [6] Hudson J A 1981 *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* **64** 133
- [7] Hudson J A, Liu E, Crampin S 1996 *Geophysical Journal International* **124** 105
- [8] Hudson J A, Pointer T, Liu E 2001 *Geophysical Prospecting* **49** 509
- [9] Thomsen L 1995 *Geophysical Prospecting* **43** 805
- [10] Schoenberg M, Douma J 1988 *Geophysical Prospecting* **36** 571

- [11] Schoenberg M, Sayers C M 1995 *Geophysics* **60** 204
- [12] Du Q Z Kong L Y, Han S C 2009 *Chinese J. Geophys* **52** 1049 (in Chinese)[杜启振, 孔丽云, 韩世春 2009 地球物理学报 **52** 1049]
- [13] Kong L Y, Wang Y B, Yang H Z 2012 *Chinese J. Geophys* **55** 189 (in Chinese)[孔丽云, 王一博, 杨慧珠 2012 地球物理学报 **55** 189]
- [14] Brajanovski M, Gurevich B, Schoenberg M 2005 *Geophysical Journal International* **163** 372
- [15] Liang K 2006 *PhD Dissertation* (Dongying: China University of Petroleum (EastChina)) (in Chinese) [梁锴 2006 博士学位论文 (东营: 中国石油大学(华东))]
- [16] Li Z C, Zhang J H 2004 *Seismic Data Processing* (Dongying: University of petroleum press) (in Chinese) [李振春, 张军华 2004 地震数据处理方法 (东营: 石油大学出版社)]
- [17] Han L H 2011 *Master Dissertation* (Qingdao: Ocean University of China) (in Chinese) [韩令贺 2011 硕士学位论文 (青岛: 中国海洋大学)]
- [18] Qin T 2009 *Master Dissertation* (Dongying: China University of Petroleum (EastChina)) (in Chinese) [秦童 2009 硕士学位论文 (东营: 中国石油大学(华东))]
- [19] Whitmore N D 1983 *53rd Ann. Internat. Mtg., Soc. Explor. Geophys., Expanded Abstracts* 382
- [20] McMechan G A 1983 *Geophysical Prospecting* **31** 413
- [21] Baysal E, Kosloff D D, Sherwood J W C 1983 *Geophysics* **48** 1514
- [22] Loewenthal D, Mufti I 1983 *Geophysics* **48** 627
- [23] Chang W F, McMechan G A 1986 *Geophysics* **51** 67
- [24] Zhang B M, Dong M Y, Li C C, Teng J W, Zhang Z J 2000 *Journal of Changchun University of Science and Technology* **30** 67 (in Chinese) [张秉铭, 董敏煜, 李承楚, 滕吉文, 张中杰 2000 长春科技大学学报 **30** 67]
- [25] Zhang H X, Ning S N 2002 *J. CUMT* **31** 371 (in Chinese) [张会星, 宁书年 2002 中国矿业大学学报 **31** 371]
- [26] Du Q Z Qin T 2009 *Chinese J. Geophys* **52** 801 (in Chinese)[杜启振秦童 2009 地球物理学报 **52** 801]
- [27] Kong L Y, Wang Y B, Yang H Z 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 139101 (in Chinese)[孔丽云, 王一博, 杨慧珠 2013 物理学报 **62** 139101]
- [28] Chen K Y, Wu Q L, Yang W, Li L L, Fan X C 2010 *Geophysical & Geochemical Exploration* **34** 103 (in Chinese)[陈可洋, 吴清岭, 杨微, 李来林, 范兴才 2010 物探与化探 **34** 103]
- [29] Wang X M 2011 *Master Dissertation* (Dongying: China University of Petroleum (EastChina)) (in Chinese) [王雪梅 2011 硕士学位论文 (东营: 中国石油大学(华东))]
- [30] Liang B, Zhu Z M Cheng J C 2006 *Chin. Phys.* **15** 412

P-wave migration in a fracture-induced TTI double-porosity medium

Liang Bao-Jun[†]

(BGP OFFSHORE, Tianjin 300280, China)

(Received 25 October 2013; revised manuscript received 27 January 2014)

Abstract

A new algorithm for P-wave reverse time migration (RTM) in a fracture-induced TTI double-porosity medium is proposed in this paper, by combining RTM with the method of P-and S-wave field separation in high-order staggered grid finitedifference scheme. Simulation results show that for the fracture-induced TTI double-porosity medium the conventional migration with a background velocity without fractures would cause the imaging position to be under the true interface. To study the influence of fracture parameters, the phase velocity formulae are derived from Christoffel equations, and the effects of fracture angles and density are analyzed. In the 2D case, the imaging position gets closer to the real interface along with increasing fracture dip angles, while a bigger fracture density can cause much more deviation.

Keywords: fracture-induced TTI, fracture angle, fracture density, reserve time migration

PACS: 91.60.-x

DOI: [10.7498/aps.63.119101](https://doi.org/10.7498/aps.63.119101)

[†] Corresponding author. E-mail: liangbaojun@sohu.com