



唐瑞晨, 符志国, 尹成, 等. 2026. 孔隙-裂缝型储层多波地震响应特征正演分析. 地球物理学进展, 41 (1): 0228-0250, doi:10. 6038/pg2026H0511.
TANG RuiChen, FU ZhiGuo, YIN Cheng, *et al.* 2026. Forward analysis of multicomponent seismic response characteristics in pore-fracture type reservoirs. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41 (1): 0228-0250, doi:10. 6038/pg2026H0511.

孔隙-裂缝型储层多波地震响应特征正演分析

Forward analysis of multicomponent seismic response characteristics in pore-fracture type reservoirs

唐瑞晨¹, 符志国^{1,2}, 尹成^{1,2*}, 鲍祥生³

TANG RuiChen¹, FU ZhiGuo^{1,2}, YIN Cheng^{1,2*}, BAO XiangSheng³

1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500

2. 中国石油物探重点实验室页岩气地球物理研究室, 成都 610500

3. 广东石油化工学院, 茂名 525000

1. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. Shale Gas Geophysics Laboratory of China Petroleum Geophysical Exploration Key Laboratory, Chengdu 610500, China

3. Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China

摘要 随着非常规油气藏勘探开发的深入, 特别是同时具有孔隙和裂缝储集结构的孔隙-裂缝型储层成为了研究热点. 因其地质条件的复杂性, 及地震资料的带限性, 这类储层在纵波地震资料上常常表现出隐蔽性特点, 十分有必要开展孔隙-裂缝储层多波地震响应分析. 本文结合 Gassmann 方程各向异性流体替换理论和 Thomsen 各向异性参数理论, 开展等效 HTI 介质岩石物理建模; 使用 2.5 维交错网格有限差分法, 进行了高效的弹性波动正演模拟; 分析了多种地质条件下的多波 AVO 和 AVAz 响应特征和敏感性. 模型特征分析表明 PP 波近偏振幅、PS 波远偏振幅对裂缝密度和孔隙度变化更敏感, 可更好地反映两参数的变化; 不同偏移距的振幅随含水饱和度变化特征相似, 在 90% 附近存在突变现象; PP 波 AVAz 特征表现为振幅幅度近偏强远偏弱, PS 波呈相反趋势, 且均呈周期性变化, 可指示裂缝方位; 推导了 PS 波调谐厚度的定义式, 补齐了多波调谐厚度的特征分析. 总结了孔隙-裂缝型储层响应特征对实际资料解释的意义, 为理解复杂孔隙-裂缝储层波动响应特征提供了重要参考, 有助于理解复杂孔隙-裂缝储层实际地震资料现象, 可有效辅助解释方

Abstract With the deepening of exploration and development of unconventional oil and gas reservoirs, especially pore-fracture reservoirs with both pore and fracture reservoir structures have become a research hotspot. Due to the complexity of geological conditions and the band limit of seismic data, these reservoirs often show hidden characteristics on longitudinal seismic data, and it is very necessary to carry out multi-wave seismic response analysis of pore-fracture reservoirs. In this paper, we combine the anisotropic fluid substitution theory of Gassmann equation and Thomsen anisotropic parameter theory to carry out equivalent HTI medium petrophysical modeling; use 2.5-dimensional staggered-grid finite-difference method to carry out highly efficient elastic fluctuation orthotropic simulation; and analyze the characteristics and sensitivity of the multi-wave AVO and AVAz responses in a variety of geological conditions. The model characterization shows that the PP wave near-deviation amplitude and PS wave far-deviation amplitude are more sensitive to the changes of fracture density and porosity, which can better reflect the changes of the two parameters; the amplitudes of different offset distances have similar characteristics of the changes with water saturation, and there is a sudden change near 90%; the PP wave AVAz characteristics show that the amplitude amplitude is near-deviation and far-deviation, and the PS wave shows the opposite trend, and all of them are periodic changes, which can indicate the The PS wave AVAz characteristics show an opposite trend in amplitude, and both of them change periodically, which can indicate the fracture orientation; the defining equation of the PS

收稿日期 2025-03-23; 修回日期 2025-10-17.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 海洋油气勘探国家工程研究中心 2022 年度开放基金课题 (CCL2022RCPS0797RQN) 资助.

第一作者简介 唐瑞晨, 女, 1999 年生, 硕士研究生, 研究方向为复杂储层多波正演响应分析与解释方法. E-mail: 1287903684@qq.com

* 通讯作者 尹成, 男, 1965 年生, 教授, 研究方向为地震属性分析、地震采集优化设计. E-mail: yinn@sohu.com

案设计,提升解释的准确性.

关键词 孔隙-裂缝型储层;岩石物理;HTI 介质;各向异性参数;AVO;AVAz

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2026II0511

CSTR:32085.14.pg2026II0511

wave tuned thickness is deduced, which complements the characterization of the multi-wave tuned thickness. The significance of the pore-fracture type reservoir response characteristics to the actual data interpretation is summarized, which provides an important reference for understanding the fluctuation response characteristics of complex pore-fracture reservoirs, helps to understand the actual seismic data phenomena of complex pore-fracture reservoirs, and can effectively assist the design of the interpretation scheme to improve the accuracy of the interpretation.

Keywords Pore-fracture reservoir; Petrophysics; HTI medium; Anisotropy parameter; AVO; AVAz

0 引言

目前,孔隙-裂缝型储层逐渐成为非常规油气藏的勘探开发的一类重要的地质研究目标.然而,孔隙、裂缝共存的结构具有明显的非均质性和各向异性,增加了储层预测的多解性,为勘探开发带来巨大的挑战,甚至造成了储层预测的“陷阱”.单一孔隙型储层理论不再能满足复杂地质结构的特征分析,因此十分必要采用更符合实际储层地质条件的岩石物理理论,构建更贴近实际储层特征的地质模型,研究孔、缝并存的储层地震响应特征,对实际资料解释具有重要的指导意义.

前人已对单一孔隙型或裂缝型储层的特征分别进行过大量侧重岩石物理的分析研究.

在孔隙型储层的研究方面,研究逐渐从孔隙介质弹性力学转向孔隙介质弹性理论的微观特征(秦小英,2023).张玉华(2007)结合 Xu-White 模型与 Gassmann 方程,基于实际测井资料建立多层模型,并采用 Zoeppritz 方程进行正演模拟,分析孔隙度、泥质含量以及含水饱和度对波速、泊松比以及反射系数的影响;李勇根和徐胜峰(2008)基于合成记录的正演模拟,分析地层厚度、孔隙度以及流体饱和度变化引起地震响应的规律;苏云(2010)基于 Biot 理论建立双相层状模型,并采用高阶交错网格有限差分方程正演,分析孔隙度变化、填充流体类型对共炮点记录与 AVA 特征曲线的影响;李红梅(2013)推导了孔隙黏弹性介质反射率法的正演模拟方法,分析了孔隙黏弹性介质的 AVO 特性和孔隙度、流体类型、品质因子对 AVO 响应的影响;李键(2014)使用 Gassmann 方程研究了砂岩储层内部气、水层在不同孔隙度条件下的 AVO 地震响应特征;万秀娟(2012)基于波动方程和 Gassmann 方程正演,分析孔隙中不同种类填充物的响应特征;化世榜(2016)结合 White 斑块饱和理论构建含流体孔隙介质模

型,分析孔隙度、渗透率和流体类型对纵波速度与衰减的影响.

在裂缝型储层研究方面,裂缝作为油气储集空间、运移通道,及地震各向异性成因等许多因素逐渐成为研究焦点,裂缝勘探技术在油气开发中占有十分重要的地位(刘敬寿等,2019).刘百红等(2010)根据线性滑移模型理论结合 Vavrycuk 的 P 波反射系数公式,分析裂缝密度、方位、填充物的 AVO 特征;袁振宇(2014)采用旋转交错网格有限差分算法模拟黏弹性裂缝型储层,分析基质 Q 值、填充流体、裂缝密度、纵横比、倾角、方位角变化对振幅的影响;符伟(2016)针对水平裂缝选用传播矩阵反射率法进行模拟,分析其 PP 波 AVO 响应,针对垂直裂缝选用 Schoenberg 反射率法进行模拟分析 PP 波在储层厚度、裂缝密度、水平层理、黏弹性顶底界面的方位 AVO 响应特征;钟雨(2016)推导声波二维交错网格波动方程并进行正演模拟,分析裂缝规模对振幅的影响;陆能等(2017)使用简化的反射率法模拟并分析了 PP 波入射角变化、上覆层各向异性程度对目标层顶底界面反射波 AVAz 特征的影响;李良泉(2017)使用波动方程数值模拟,分析裂缝模型、孔洞模型、缝洞组合的响应特征;蒋存浩(2021)采用 Hudson 模型、Chapman 单、双裂缝模型对裂缝介质进行数值模拟,分析流体类型、裂缝密度、孔隙度对纵波速度和各向异性参数的影响.

随着非常规油气藏的勘探开发,孔隙、裂缝两者混合的储层具有更为复杂的波场和响应特征.潘博(2017)进一步推导出 Gurevich(2003)的饱和多孔 HTI 介质等效介质理论,建立煤岩裂缝储层、页岩裂缝储层和致密砂岩裂缝储层的两层理论模型,使用 Ruger 在 2002 年提出的 HTI 介质的 PP、PS 波反射系数公式进行数值模拟正演,研究含水饱和度、裂缝尺度大小变化的 AVO 反射系数响应特征;窦喜英等(2017)推导出 Thomsen 裂缝模型的广义各向异性

参数,并将其引入 HTI 介质的 PP、PS 波的弹性反射系数方程中,研究 PP、P-SV 波反射系数随着入射角、方位角、裂缝密度、含水饱和度的变化响应特征;杨帅等(2018)基于 Biot-Gassmann 流体替换理论和 Thomsen 各向异性理论建立等效 HTI 模型,通过 Ruger 的 HTI 介质反射系数近似公式正演模拟,分析含裂缝致密砂岩的 PP、PS1、PS2 波裂缝密度变化时 AVO 反射系数响应特征;秦小英(2023)基于 Wood 理论、SCA 理论构建单孔隙和孔隙加微裂缝模型,得出孔隙加微裂缝模型更能够反映缝孔介质的非均质性,并基于致密砂岩的储层厚度和孔隙度的空间展布构建三维岩石物理模板对含气饱和度进行定量解释.

上述对孔隙-裂缝型储层多种地质条件的岩石物理特征研究较多,而对其多波地震波场响应特征分析还缺乏系统性分析.为了促进对孔隙-裂缝型储层的多波响应特征的系统认识,并指导多波地震资料解释,本文从测井数据中提取相关弹性参数,结合 Gassmann 方程各向异性流体替换理论和 Thomsen 各向异性理论构建孔隙-裂缝模型,使用 2.5 维(2.5D)交错网格有限差分法,以较高精度高效地正演三维弹性波动波场,并对正演的炮记录进行预处理,进而分析储层厚度、裂缝方位角、裂缝密度、孔隙度和含水饱和度变化的 PP、PS 波响应特征以及敏感性,推导出了 PS 波调谐厚度的定义式,补充了多波调谐厚度特征分析.最后,总结了各项特征对实际资料解释的意义,为实际应用提供了有益的参考.

1 波场正演方法与原理

研究孔隙-裂缝型储层地震波响应特征时,要充分考虑到岩石干骨架、孔隙、裂缝和流体之间的关系.本文针对含流体的孔隙-裂缝型储层使用 Gassmann 方程各向异性流体替换理论和 Thomsen 各向异性参数理论,逐级耦合基质矿物、定向裂缝和孔隙流体,构建孔隙-裂缝模型(刘姝娴等,2024),并

通过交错网格有限差分法,进行 2.5D 弹性波动方程正演,进而分析孔隙-裂缝型储层的多波地震响应特征.

1.1 孔隙-裂缝储层模型的基础弹性参数

岩石物理学中为了使得理论模型与实际地质情况更接近,认为孔隙-裂缝型储层是由岩石骨架、裂缝和孔隙,并填充流体构成的.如图 1 所示,红色的是垂直裂缝,蓝色的是孔隙.其中,模型具体的基础弹性参数如表 1 所示,这些参数是孔隙-裂缝型储层模型搭建以及响应分析所必需的.

表 1 地球物理参数表

Table 1 Geophysical parameters table

参数	值
砂岩体积模量/Pa	36.6
泥岩体积模量/Pa	20.9
砂岩体积比	0.95
泥岩体积比	0.05
砂岩密度/(g/cm ³)	2.65
泥岩密度/(g/cm ³)	2.25
水体积模量/Pa	2.38
气体积模量/Pa	0.02
水的密度/(g/cm ³)	1.2
气的密度/(g/cm ³)	0.2

1.2 孔隙-裂缝储层等效介质模型

对于多孔饱含流体的各向异性介质,Gurevich(2003)基于 Gassmann(1951)各向异性流体替换方程,推导了多孔 HTI 介质流体替换的显示表达式,使用干刚度矩阵和附加流体效应表示各向异性岩石的饱和刚度矩阵:

$$\mathbf{C}_{ij}^{\text{sat}} = \mathbf{C}_{ij}^{\text{dry}} + \alpha_i \alpha_j \mathbf{M}, \quad i, j = 1, \cdots, 6, \quad (1)$$

其中, α 是 Biot-Willis 系数(Biot and Willis,1957), $\mathbf{C}_{ij}^{\text{dry}}$ 是各向异性介质的干刚度矩阵(Schoenberg and Sayers,1995):

$$\mathbf{C}_{ij}^{\text{dry}}(\text{HTI}) = \begin{bmatrix} M_b(1-\Delta_N) & \lambda(1-\Delta_N) & \lambda(1-\Delta_N) & 0 & 0 & 0 \\ \lambda(1-\Delta_N) & M_b(1-r^2\Delta_N) & \lambda(1-r\Delta_N) & 0 & 0 & 0 \\ \lambda(1-\Delta_N) & \lambda(1-r\Delta_N) & M_b(1-r^2\Delta_N) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu(1-\Delta_T) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu(1-\Delta_T) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

干刚度矩阵部分:

$$\begin{cases} M_b = \lambda + 2\mu, r = \frac{\lambda}{M_b} \\ \Delta_N = \frac{4dc}{3g(1-g)}, \Delta_T = \frac{16dc}{3(3-2g)} \end{cases}, \quad (3)$$

流体效应部分:

$$\begin{cases} \alpha_0 = 1 - \frac{K}{K_g}, \alpha_1 = \alpha_0 + \frac{K\Delta_N}{K_g}, \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_0 + \frac{K\lambda\Delta_N}{K_g M_b} \\ K^* = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 C_{ij}^{dry}, M = \frac{K_g}{\left(1 - \frac{K^*}{K_g}\right) - \varphi\left(1 - \frac{K_g}{K_f}\right)} \end{cases}. \quad (4)$$

Thomsen(1986)在研究各向异性介质的基础上,证明了现存介质大多都呈弱-中各向异性,总结出了具有明确物理意义的 TI 介质的各向异性参数 $\alpha, \beta, \varepsilon, \delta, \gamma$.

在 VTI 介质中地震波在传播的过程中水平速度

和垂直速度会存在差异,则 Thomsen 各向异性参数与刚度矩阵之间的关系如下:

$$\begin{cases} \alpha = \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}}, \beta = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}} \\ \varepsilon = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}}, \gamma = \frac{C_{66} - C_{44}}{2C_{44}}, \delta = \frac{(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{44})} \end{cases}, \quad (5)$$

其中, α 表示纵波的垂向速度, β 表示横波的垂向速度.

1.3 波动方程

由于孔隙-裂缝型储层较为复杂,使用 2D 弹性波动方程正演还未能较好模拟实际的波动特征;3D 弹性波动方程可以更好地模拟波在三维空间的传播,但会消耗大量的时间;而 2.5D 弹性波动方程可在三维空间的 2D 区域内近似模拟三维波动特征,具有三分量记录,大大节约了计算量,对 TTI 介质的研究有良好的适用性,如式(6)所示:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} = C_{11} \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{16} \frac{\partial v_y}{\partial x} + C_{15} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + C_{14} \frac{\partial v_y}{\partial z} + C_{13} \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} = C_{13} \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{36} \frac{\partial v_y}{\partial x} + C_{35} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + C_{34} \frac{\partial v_y}{\partial z} + C_{33} \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial t} = C_{14} \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{46} \frac{\partial v_y}{\partial x} + C_{45} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + C_{44} \frac{\partial v_y}{\partial z} + C_{34} \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial t} = C_{15} \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{56} \frac{\partial v_y}{\partial x} + C_{55} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + C_{45} \frac{\partial v_y}{\partial z} + C_{35} \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial t} = C_{16} \frac{\partial v_x}{\partial x} + C_{66} \frac{\partial v_y}{\partial x} + C_{56} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + C_{46} \frac{\partial v_y}{\partial z} + C_{36} \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{cases}. \quad (6)$$

本文孔隙-裂缝介质模型正演使用了较高精度的交错网格有限差分法(鲁雁翔,2019;张兆谦等,2024)进行波动模拟.波场分量如图 2 所示,包含两个速度分量和三个应力分量,展示了某一时刻应力与速度的对应交错关系,图 2a 是该时刻波场五分量的空间交错示意图,各分量之间相差半个节点,黑色为速度分量,白色为应力分量.图 2b 是该时刻和前半时刻对应的波场量的交错示意图,表征了交错网格在时间上的交错.图 2c 是当前时刻的应力分量值(速度分量值)和相邻半个时刻的速度分量(应力分

量值),计算下一时刻的应力分量值(速度分量值),往复循环遍历每一时刻对应的波场值从而得到波场的数值模拟结果.

2 实验设计

本文分析孔隙-裂缝型储层在多物性参数变化情况下的响应特征,为此将多个实验模型沿 Y 轴方向排列为一个总体模型,如图 3 所示.模型的第 3 层为目标储层,是本文分析的目标.其余的第 1、2、4 层不能过于复杂,设置为各向同性标准层.平行于 Oxz

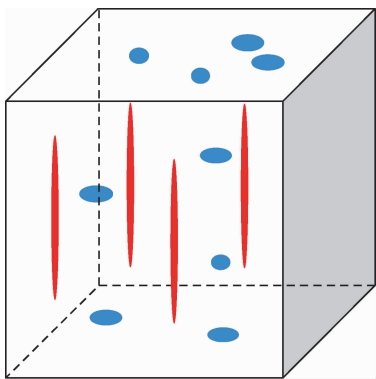


图1 孔隙-裂缝型储层地质条件示意图
(孔隙(蓝)和裂缝(红))
Fig.1 Schematic diagram of pore-fracture
reservoir geological conditions(pores (blue)
and fractures (red))

面设置剖面模型,其中红色线为模型分界线,第Ⅰ部分是储层厚度变化模型示意图,第Ⅱ部分是控制储

层厚度不变,裂缝方位角、孔隙度、裂缝密度和含水饱和度变化的模型示意图.其中, x 方向宽度为400个网格,即400道,道间距5 m, z 方向长度210个网格,层间距5 m,炮点位置在 $(x,z)=(200,10)$ 网格点处(图中红色标记处),目标储层是裂缝倾角为 90° 的HTI介质,图3左上角是储层裂缝方位角示意图,以逆时针方向为正方向,正演分析的是偏移距分别为0、18、36、54、72、90网格处目标层顶界面的响应特征.

每个模型的剖面从图3中抽取,储层厚度变化模型从第Ⅰ部分中抽取,储层的方位角、裂缝密度、孔隙度和含水饱和度变化模型从第Ⅱ部分根据相应的参数变化进行抽取.基于目标层会随条件变化,这里先确定第1、2、4层的参数设计,如表2所示,从左到右的参数依次是:层数、每层的厚度、纵波速度、横波速度、密度、 ε 、 γ 、 δ 、 $\theta/(^{\circ})$ 、 $\varphi/(^{\circ})$.

表2 第1、2、4层的参数设计
Table 2 Parameter design for the 1st, 2nd, and 4th Layers

层号	H/m	$V_p/(m/s)$	$V_s/(m/s)$	$\rho/(kg/m^3)$	ε	γ	δ	$\theta/(^{\circ})$	$\varphi/(^{\circ})$
1	600	5200	3002	2632	0	0	0	0	0
2	400	4840	2635	2586	0	0	0	0	0
3	change	change	change	change	change	change	change	90°	change
4	1000	5500	2895	2670	0	0	0	0	0

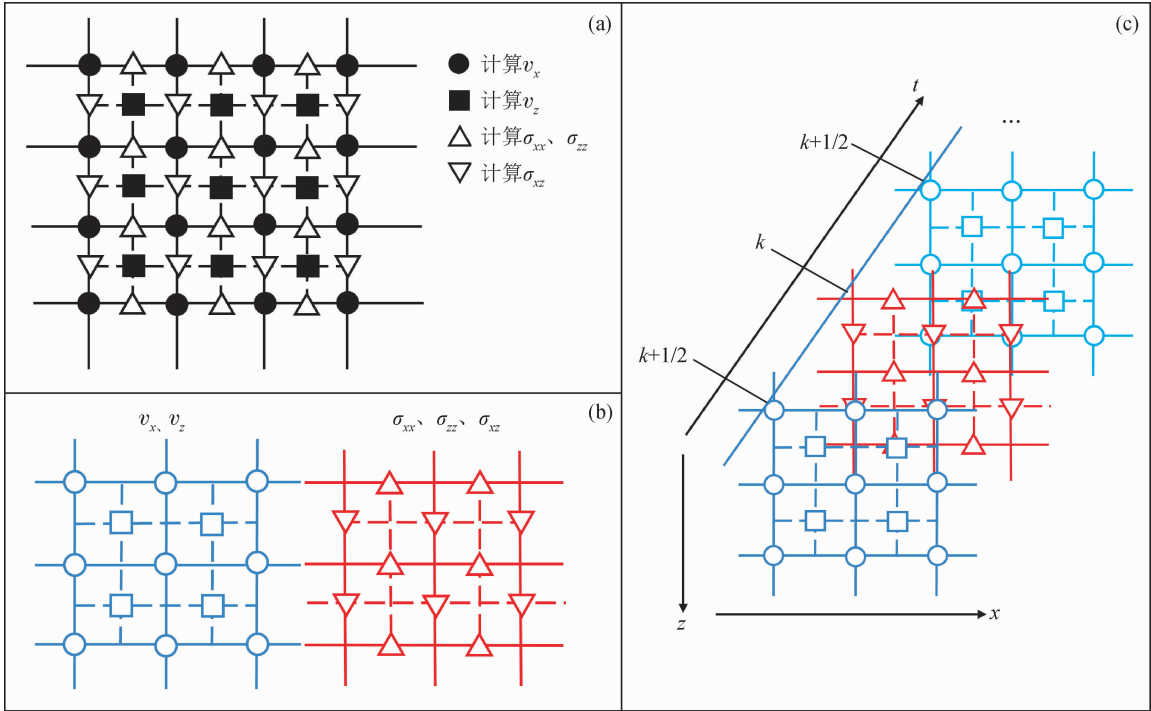


图2 离散应力速度方程波场分量的交错排列示意图
(a) 网格空间交错示意图;(b) 网格时间空间交错示意图;(c) 不同时刻网格时间空间交错示意图。
Fig.2 Schematic diagram of the staggered arrangement of discrete stress-velocity equation wavefield components
(a) Schematic diagram of spatial staggering in the grid;(b) Schematic diagram of temporal-spatial staggering in the grid;
(c) Schematic diagram of temporal-spatial staggering in the grid at different time steps.

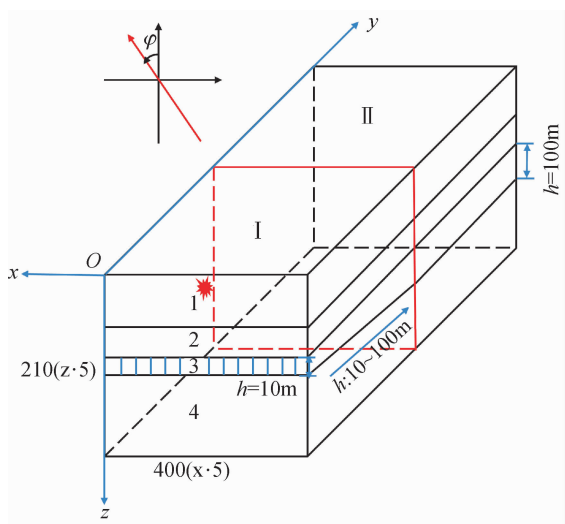


图3 模型示意图
Fig.3 Model schematic diagram

3 模型地震波场响应特征分析

3.1 模型数据预处理

经过基于交错网格有限差分法的 2.5D 弹性波动方程正演后,需要对每道记录进行预处理从而便于后续 的响应特征分析,图 4 是具体的处理流程. PS 波的自激自收那一道初至波相位是对称的直接进行下一步处理,处理结束后 PS 波仅取除自激自收的其他道数据. 以储层厚度 100 m 的模型为例说明前三步,以孔隙度变化模型的近偏数据为例说明最后一步,见附录图 A1.

(1)道集选择. 抽取 PP、PS 波单道记录,按模型参数变化排序,构成道集,供 AVO 振幅响应特征分析使用.

(2)相位处理. 将初至波处理为以主波峰(谷)为基准的对称形式,以便目标储层层位的确定.

(3)初至去除. 初至波的能量远大于反射波,淹没了反射能量,使用初至波切除的方式消除干扰,以便观察反射特征.

(4)参考基准的标准化. 使用梯度进行敏感性分析的过程中,引入选取基准的标准化方法,统一 PP、PS 波的振幅能量级别,如式(7)所示. 各种比较

分析的基准选取将在后文中具体说明. 式(7)为:

$$I_s = \frac{I_i - I_{basis}}{I_{basis}}.$$

(7)

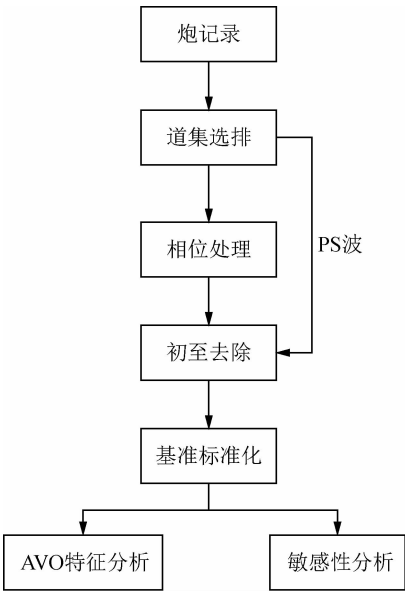


图4 处理流程图
Fig.4 Processing flow chart

3.2 储层厚度变化模型响应特征分析

3.2.1 储层厚度变化模型正演及 AVO 特征分析

储层厚度变化模型的参数设置如表 3 所示,储层厚度范围为 10 ~ 100 m,使用孔隙-裂缝型储层等效介质理论,控制裂缝方位角 0°,裂缝倾角 90°,裂缝密度 0.07,孔隙度 0.13,含水饱和度 50%,计算出纵、横波速度(V_p 、 V_s)、密度(ρ)以及各向异性参数值(ε 、 δ 、 γ)进行正演. 提取 PP、PS 波的不同偏移距振幅数据得到振幅随储层厚度变化 AVO 曲线,如图 5 所示. 表 4 小结了多波的自有特征,PP 波的视调谐厚度随偏移距增大而增大,而 PS 波的视调谐厚度随偏移距变化不明显,PS 波储层厚度变化的 AVO 特征相比于 PP 波更强;多波的共有特征,随储层厚度的变化均存在调谐特征并且不受偏移距的影响,因调谐特征的振幅变化是非线性的偏移距和储层厚度的变化会产生相同的振幅.

表 3 储层厚度变化参数设置

Table 3 Parameter settings for reservoir thickness variation

层号	H/m	$V_p/(m/s)$	$V_s/(m/s)$	$\rho/(kg/m^3)$	ε	γ	δ	$\theta/(^{\circ})$	$\varphi/(^{\circ})$
3	10/20/30/35/40/50 /60/70/80/90/100	4237	2601	2379	-0.1104	-0.0827	-0.0433	90	0

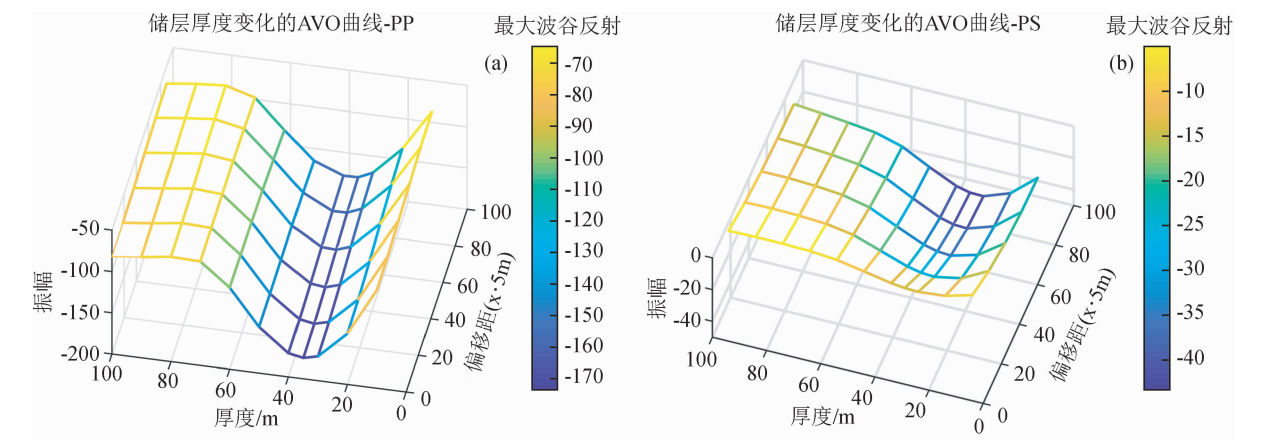


图 5 振幅随储层厚度变化 AVO 曲线
(a) PP 波的储层厚度变化 AVO 曲线;(b) PS 波的储层厚度变化 AVO 曲线.

Fig. 5 AVO curves of amplitude variation with reservoir thickness

(a) AVO curve of PP - wave with reservoir thickness variation;(b) AVO curve of PS-wave with reservoir thickness variation.

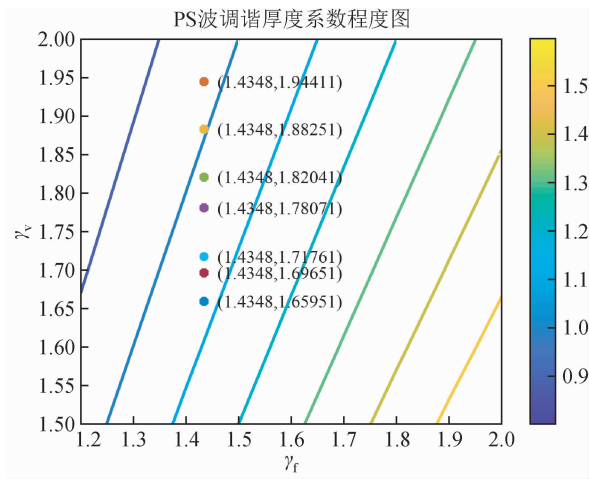


图 6 PS 波调谐厚度参数分布图

Fig. 6 Parameter distribution diagram for PS-wave tuning thickness

表 4 振幅随储层厚度变化的 AVO 特征

Table 4 AVO characteristics with amplitude variation as a function of reservoir thickness

波型	自有特征	共有特征
PP	视调谐厚度随偏移距增大而增大;储层厚度无论大小,AVO 特征弱	调谐特征不受偏移距影响;偏移距和储层厚度的变化会产生相同的振幅.
PS	视调谐厚度变化特征不明显;储层厚度无论大小,AVO 特征强	

3.2.2 PS 波调谐厚度特征

在地震勘探中,调谐现象是指当地层厚度与地震波的主频波长相匹配时,反射波发生干涉导致最

大振幅的现象,这时的厚度称为调谐厚度. PP 波的调谐厚度通常由地层厚度等于四分之一波长 ($\lambda/4$) 时的干涉效应来定义. 由于 PS 波是由纵波转换为横波的复合波,其传播速度较 PP 波不同,因此对应的波长也有所变化. 根据波长与速度的关系,PS 波的调谐厚度可以通过 PP 波调谐厚度的定义并结合 PS 波的波速进行推导,从而得到 PS 波调谐厚度定义. 根据 PP 波的调谐厚度的定义 (Widess,1973) :

$$\Delta h_{pp} = \frac{v_p T_p}{4} = \frac{v_p}{4f_p} = \frac{\lambda_p}{4}, \tag{8}$$

其中, v_p 为目标层的纵波速度, T_p 为纵波的子波周期, λ_p 为纵波的波长, f_p 为 PP 波主频. 波的传播过程是纵波入射 PS 波反射,并且层厚为 $\lambda/4$ 时双程时差为 $T/2$ (陆基孟和王永刚,2011),由此推导 PS 波的调谐厚度:

$$\frac{\Delta h}{v_p} + \frac{\Delta h}{v_s} = \frac{T_s}{2}, \tag{9}$$

$$\Delta h(1 + \gamma_v) = \frac{T_s}{2} \cdot v_p, \tag{10}$$

$$\Delta h = \frac{v_p}{2 \cdot f_s \cdot (1 + \gamma_v)}, \tag{11}$$

又因 $\gamma_f = \frac{f_p}{f_s} \Rightarrow f_s = \frac{f_p}{\gamma_f}$:

$$\Delta h_{ps} = \frac{v_p \cdot T_p \cdot \gamma_f}{2 \cdot (1 + \gamma_v)}, \tag{12}$$

其中,根据式(8)可知, $\frac{v_p \cdot T_p}{2} = \frac{\lambda_p}{2} = 2\Delta h_{pp}$, 令 $C_h =$

$$2 \frac{\gamma_f}{1 + \gamma_v}:$$

$$\Delta h_{ps} = \Delta h_{pp} \cdot C_h, \tag{13}$$
其中, γ_f 为 PP、PS 波的主频比, γ_v 为 PP、PS 波的速度比.

表 5 PS 波调谐厚度测试参数
Table 5 Test parameters for PS-wave tuning thickness

第 k 组 模型参数	Δh_{ps}	Δh_{pp}	γ_f	γ_v	C_h
1	31	32		1.9441	0.9747
2	36	36		1.8825	0.9955
3	34	34		1.8204	1.0174
4	34	33	1.4348	1.7807	1.0320
5	34	33		1.7176	1.0559
6	31	29		1.6965	1.0642
7	35	33		1.6595	1.0790

下面分析常见的一些多波地震参数条件下的多波调谐厚度关系: 根据表 5 与图 6 所示, 主频比 1.4348, 速度比在 [1.72, 1.94] 区间内, PS 波调谐厚度系数在 [0.97, 1.05] 区间内, PP 和 PS 波的调谐

厚度几乎相等, 即 $\Delta h_{pp} \approx \Delta h_{ps}$. 此特征表明, 如分析小于调谐厚度的薄储层时, 可不用考虑调谐的影响, 这将有利于多波反射特征反映岩性、物性差异.

3.3 储层孔隙度变化模型响应特征分析

3.3.1 储层孔隙度变化模型正演及 AVO 特征分析

模型储层孔隙度参数变化情况如图 7 所示, 控制裂缝方位角 0°, 裂缝倾角 90°, 裂缝密度 0.07, 储层厚度 100 m, 含水饱和度 50%, 储层孔隙度范围为 0.01 ~ 0.25. 纵、横波速度和密度随孔隙度增加呈减小趋势, Thomsen 各向异性参数有不同程度的变化趋势. 提取 PP、PS 波的不同偏移距的振幅数据得到振幅随孔隙度变化 AVO 曲线与梯度曲线, 如图 8 所示. 表 6 小结了多波的共有特征, 随孔隙度增大纵、横波速度和密度减小导致目标储层与第二层的波阻抗差异增大, 振幅的幅度呈现增大趋势; 低孔隙度 AVO 特征弱, 高孔隙度 AVO 特征强. 对于 PP 波进一步提取不同偏移距振幅的梯度值, 可见近偏振幅响应更强烈, 即近偏的振幅对孔隙度更敏感; 对于 PS 波进一步提取不同偏移距振幅的梯度值, 可见远偏振幅响应更强烈, 即远偏的振幅对孔隙度更敏感.

表 6 振幅随孔隙度变化的 AVO 特征
Table 6 AVO characteristics of amplitude variation with porosity

波型	自有特征	共有特征
PP	孔隙度变化时, 提取不同偏移距振幅的梯度值, 得到近偏振幅响应更强烈, 即近偏振幅对孔隙度更敏感	随孔隙度的增加, 振幅幅度呈增大趋势, 指出振幅对孔隙度是具有敏感性的; 低孔隙度 AVO 特征弱, 高孔隙度 AVO 特征强
PS	孔隙度变化时, 提取不同偏移距振幅的梯度值, 得到远偏振幅响应更强烈, 即远偏振幅对孔隙度更敏感	

3.3.2 振幅随储层孔隙度变化的敏感性分析

抽取近偏入射角 10° 的 PP、PS 波振幅响应曲线, 如图 9 所示, 孔隙度变化对 PP、PS 波振幅幅度影响呈增大趋势, 在致密背景的基础上, 分析孔隙发育的情况, 因此以孔隙度 0.01 为基准, 由基准标准化的梯度曲线可见孔隙度对 PP 波振幅的影响更大.

3.4 储层裂缝密度变化模型响应特征分析

3.4.1 储层裂缝密度变化模型正演及 AVO 特征分析

模型储层裂缝密度参数变化情况如图 10 所示, 控制裂缝方位角 0°, 裂缝倾角 90°, 储层厚度 100 m, 含水饱和度 50%, 孔隙度 0.13, 储层裂缝密度范围为 0.01 ~ 0.13. 纵、横波的垂向和水平速度及 Thomsen 各向异性参数随裂缝密度的增大呈减小趋

势, 其中水平传播的纵波和横波是垂直裂缝传播的, 所以速度减小的斜率更大; 垂向传播的纵波和横波是顺裂缝传播的, 所以速度减小的斜率较小, 而 Schoenberg 线性滑动理论对快横波没有影响所以垂向传播的横波没有变化 (帅达等, 2019), 并且 Schoenberg 线性滑动理论将裂缝在理想情况下等效为一个很薄的平面, 即裂缝的总体积无限小, 因此裂缝所在区域的密度不会因为裂缝的存在而发生改变 (Schoenberg, 1980). 提取 PP、PS 波的不同偏移距的振幅数据得到振幅随裂缝密度变化 AVO 曲线与梯度曲线, 如图 11 所示. 表 7 小结了多波共有特征, 低裂缝密度的 AVO 特征弱, 高裂缝密度 AVO 特征强. 对于 PP 波随裂缝密度的增加因波阻抗差异的变化, 近、中偏振幅幅度呈增大趋势, 指出振幅对裂缝密度是具有敏感性的; 进一步提取不同偏移距振幅的梯

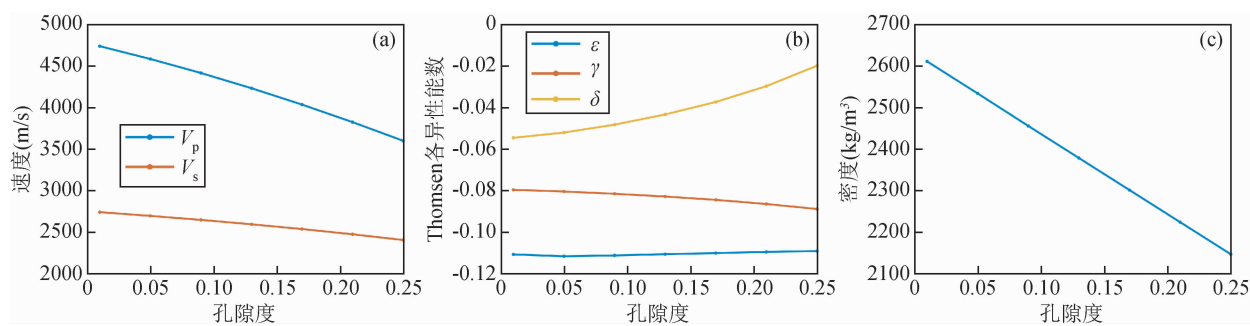


图7 模型参数随孔隙度变化曲线

(a) 纵、横波速度随孔隙度变化曲线; (b) Thomsen 各向异性参数随孔隙度变化曲线; (c) 密度随孔隙度变化曲线.

Fig. 7 Curves of model parameters with porosity variation

(a) Curves of P-wave and S-wave velocities with porosity variation; (b) Curves of Thomsen anisotropic parameters with porosity variation; (c) Curve of density with porosity variation.

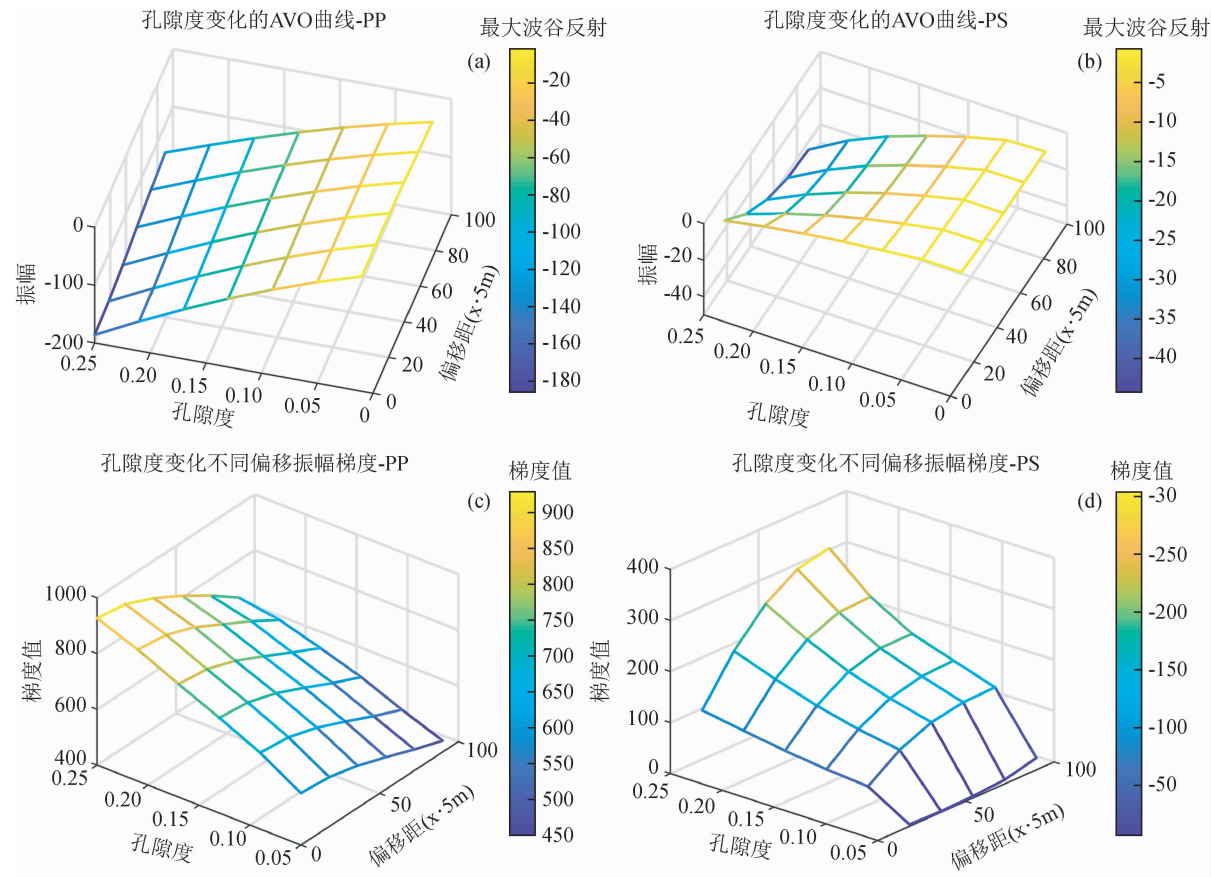


图8 振幅随孔隙度变化 AVO 曲线与梯度变化曲线

(a) PP 波的储层孔隙度变化 AVO 曲线; (b) PS 波的储层孔隙度变化 AVO 曲线; (c) PP 波的孔隙度变化不同偏移距梯度曲线; (d) PS 波的孔隙度变化不同偏移距梯度曲线.

Fig. 8 AVO curves and gradient variation curves with porosity

(a) AVO curve of PP-wave with reservoir porosity variation; (b) AVO curve of PS-wave with reservoir porosity variation; (c) Gradient curve of PP-wave with porosity variation at different offsets; (d) Gradient curve of PS-wave with porosity variation at different offsets.

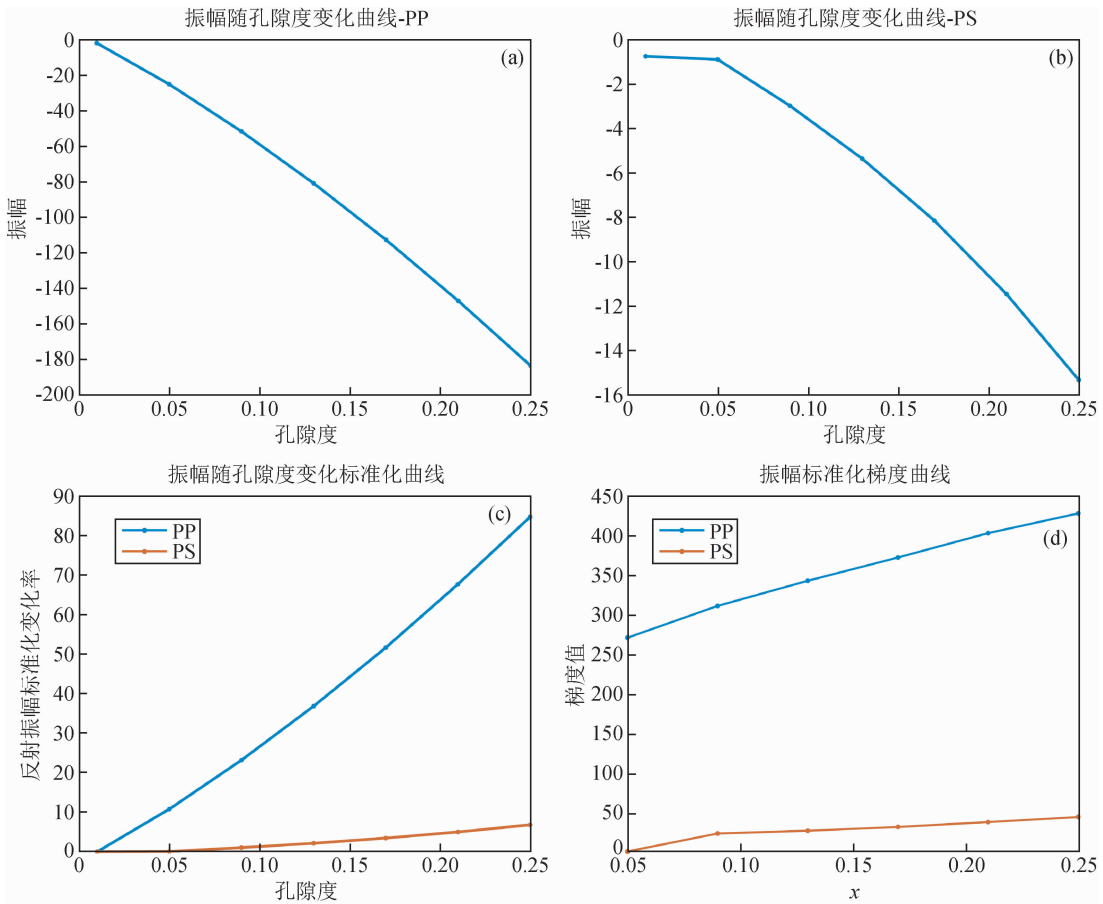


图9 振幅随孔隙度变化的响应、标准化和梯度曲线。

(a) PP波振幅随孔隙度变化曲线;(b) PS波振幅随孔隙度变化曲线;(c) 振幅随孔隙度变化标准化曲线;(d) 振幅标准化梯度曲线。

Fig.9 Response, normalized, and gradient curves of amplitude variation with porosity

(a) PP-wave amplitude variation curve with porosity;(b) PS-wave amplitude variation curve with porosity;
(c) Normalized amplitude curve with porosity;(d) Normalized amplitude gradient curve with porosity.

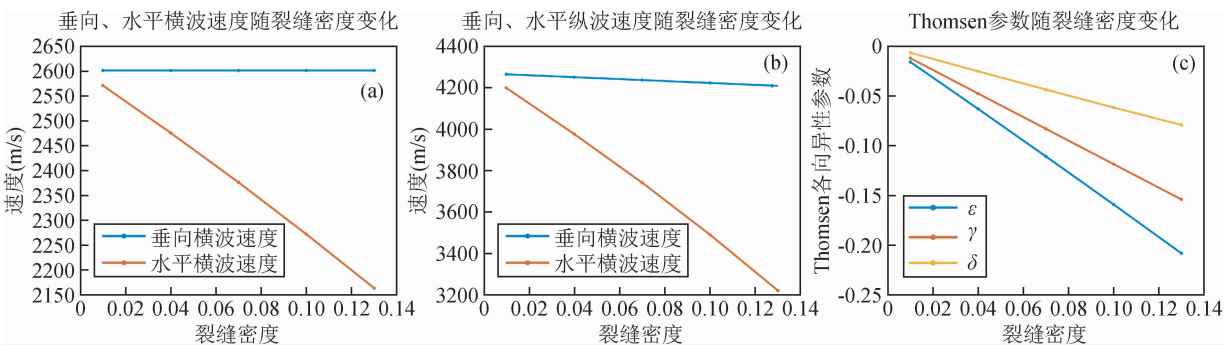


图10 模型参数随裂缝密度变化曲线

(a)垂向、水平横波速度随裂缝密度变化曲线;(b) 垂向、水平纵波速度随裂缝密度变化曲线;
(c) Thomsen 各向异性参数随裂缝密度变化曲线。

Fig.10 Curves of model parameters with fracture density variation

(a) Vertical and horizontal S-wave velocity variation curves with fracture density;(b) Vertical and horizontal P-wave velocity variation curves with fracture density;(c) Curves of Thomsen anisotropic parameters with fracture density variation.

度值,可见近偏振幅响应更强烈,即近偏振幅对裂缝密度更敏感;对于 PS 波随裂缝密度的增加因波阻抗差异的变化,振幅幅度呈增大趋势,指出振幅对裂缝

密度是具有敏感性的;进一步提取不同偏移距振幅的梯度值,可见远偏振幅响应更强烈,即远偏振幅对裂缝密度更敏感。

表 7 振幅随裂缝密度变化的 AVO 特征
Table 7 AVO characteristics of amplitude variation with fracture density

波型	自有特征	共有特征
PP	随裂缝密度的增加,近、中偏振幅幅度呈增大趋势,指出振幅对裂缝密度是具有敏感性的; 裂缝密度变化时,提取不同偏移距振幅的梯度值,得到近偏振幅响应更强烈,即近偏振幅对裂缝密度更敏感	低裂缝密度的 AVO 特征弱,高裂缝密度 AVO 特征强
PS	随裂缝密度的增加,振幅幅度呈增大趋势,指出振幅对裂缝密度是具有敏感性的; 裂缝密度变化时,提取不同偏移距振幅的梯度值,得到远偏振幅响应更强烈,即远偏振幅对裂缝密度更敏感	

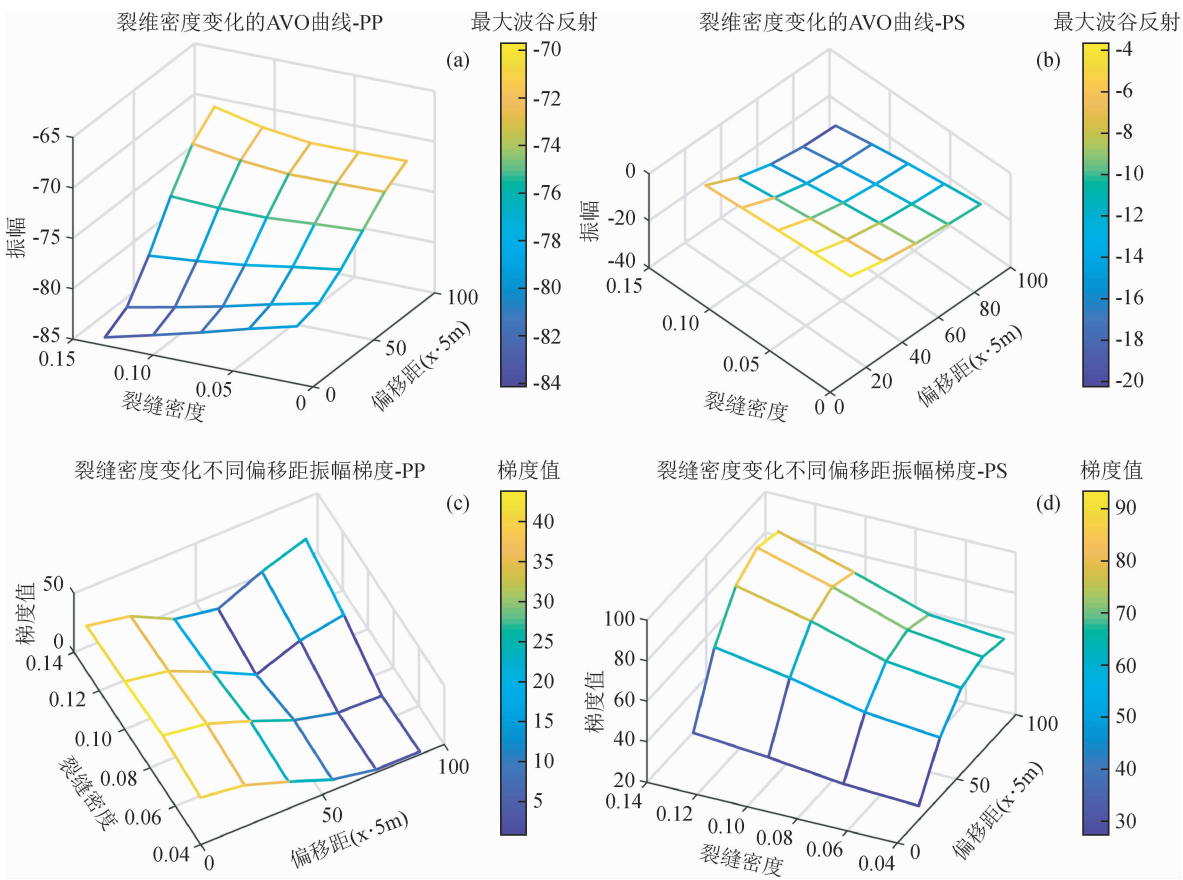


图 11 振幅随裂缝密度变化 AVO 曲线与梯度变化曲线
(a) PP 波的储层裂缝密度变化 AVO 曲线;(b) PS 波的储层裂缝密度变化 AVO 曲线;(c) PP 波的裂缝密度变化不同偏移距梯度曲线;
(d) PS 波的裂缝密度变化不同偏移距梯度曲线。

Fig. 11 AVO curves and gradient variation curves with fracture density
(a) AVO curve of PP-wave with reservoir fracture density variation;(b) AVO curve of PS-wave with reservoir fracture density variation;
(c) Gradient curve of PP-wave with fracture density variation at different offsets;(d) Gradient curve of PS-wave with fracture density variation at different offsets.

3.4.2 振幅随储层裂缝密度变化的敏感性分析
抽取近偏入射角 10° 的 PP、PS 波振幅响应曲

线,如图 12 所示,裂缝密度变化对 PP、PS 波振幅幅度影响呈增大趋势,在致密背景的基础上,分析裂缝

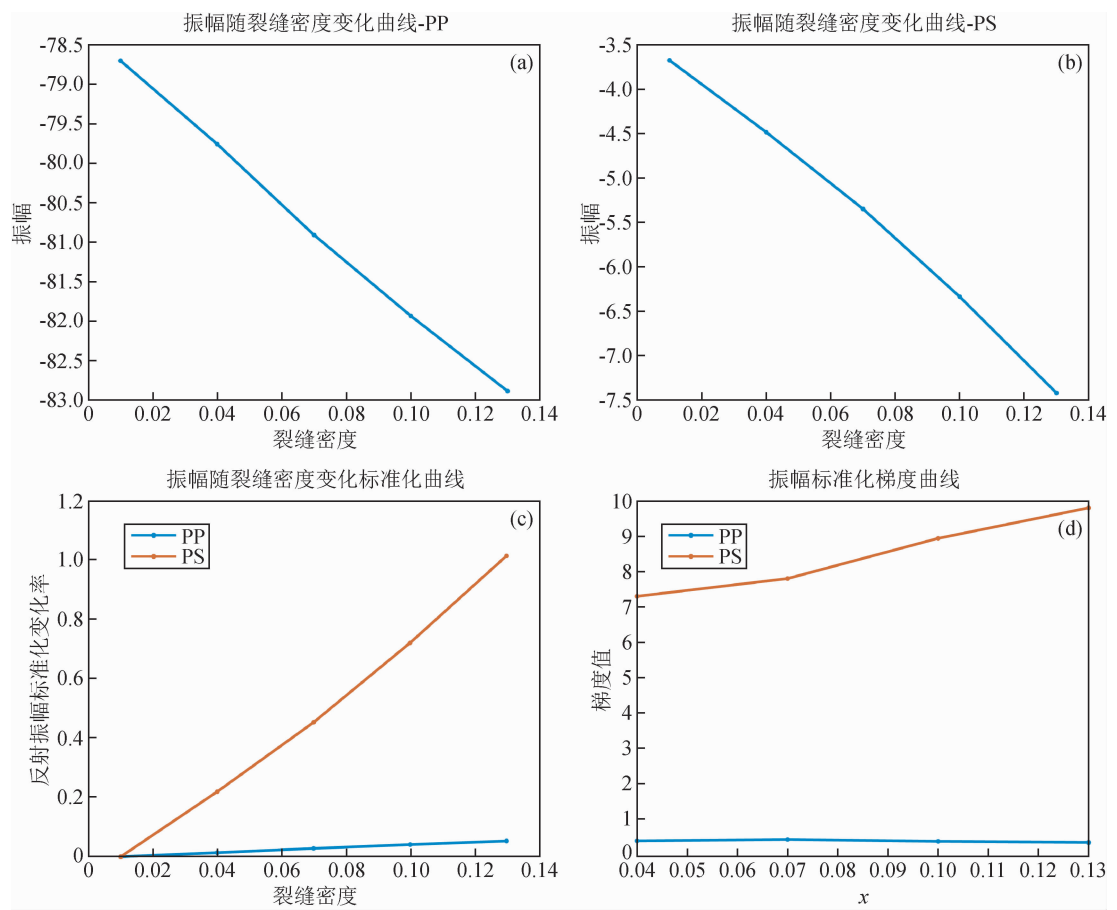


图 12 振幅随裂缝密度变化的响应、标准化和梯度曲线

(a) PP 波振幅随裂缝密度变化曲线;(b) PS 波振幅随裂缝密度变化曲线;(c) 振幅随裂缝密度变化标准化曲线;(d) 振幅标准化梯度曲线.

Fig. 12 Response, normalized, and gradient curves of amplitude variation with fracture density

(a) PP-wave amplitude variation curve with fracture density;(b) PS-wave amplitude variation curve with fracture density;

(c) Normalized amplitude curve with fracture density variation;(d) Normalized amplitude gradient curve with fracture density variation.

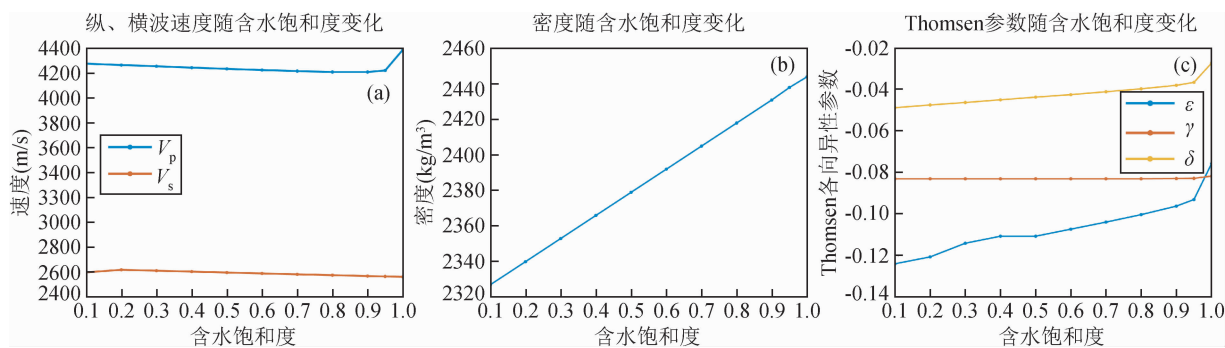


图 13 模型参数随含水饱和度变化曲线

(a) 纵、横波速度随含水饱和度变化曲线;(b) 密度随含水饱和度变化曲线;(c) Thomsen 各向异性参数随含水饱和度变化曲线.

Fig. 13 Curves of model parameters with water saturation variation

(a) P-wave and S-wave velocity variation curves with water saturation;(b) Curve of density with water saturation variation;

(c) Curves of Thomsen anisotropic parameters with water saturation.

发育的情况,因此以裂缝密度 0.01 为基准,由基准标准化的梯度曲线可见裂缝密度对 PS 波振幅的影响更大.

3.5 储层含水饱和度变化模型响应特征分析

3.5.1 储层含水饱和度变化模型正演及 AVO 特征分析

模型储层含水饱和度参数变化情况如图 13 所示,控制裂缝方位角 0°,裂缝倾角 90°,裂缝密度 0.07,储层厚度 100 m,孔隙度 0.13,储层含水饱和度范围为 0.10 ~ 1.00,纵波速度在含水饱和度为 90% ~ 100% 时,出现 Domenico 效应 (Domenico, 1974),横波速度变化很小,如图 13a 所示,Thomsen 各向异性参数 γ 几乎没有变化表明了垂直方向和水平方向横波速度差异很小.提取 PP、PS 波的不同偏移距的振幅数据得到振幅随含水饱和度变化 AVO 曲线,如图 14 所示.表 8 小结了 PP 波不同偏移距的振幅随含水饱和度变化特征相似;含水饱和度不变时,振幅幅度随偏移距增大逐渐减弱;含水饱和度为 95% ~ 100% 出现振幅突变,是由 PP 波速度突变引起的,即 Domenico 效应;对于 PS 波振幅随含水饱和度变化很小.

表 8 振幅随含水饱和度变化的 AVO 特征
Table 8 AVO characteristics of amplitude variation with water saturation

波型	自有特征	共有特征
PP	不同偏移距的振幅随含水饱和度变化特征相似;含水饱和度不变时,振幅随偏移距增大逐渐减弱;含水饱和度为 95% ~ 100% 出现振幅突变,是由 PP 波速度突变引起的.	无
PS	随含水饱和度变化振幅变化很小	

3.5.2 振幅随储层含水饱和度变化的敏感性分析

入射角 10° 的 PP、PS 波振幅响应曲线,如图 15 所示,含水饱和度对 PP、PS 波振幅幅度影响呈减小趋势,对 PS 波的影响较小,且在含水饱和度 90% ~ 100% 时 PP 波速度出现突变引发 Domenico 效应 (Domenico, 1974),从而引起振幅突变.以饱和水为背景,分析含气的情况,因此以饱和水为基准,由基准标准化的梯度曲线可见含水饱和度对 PP 波振幅的影响更大.

3.6 储层裂缝方位角变化模型响应特征分析

3.6.1 储层裂缝方位角变化模型正演及 AVO 特征分析

模型储层裂缝方位角参数变化情况如图 16 所

示,控制裂缝倾角 90°,裂缝密度 0.07,储层厚度 100 m,孔隙度 0.13,含水饱和度 50%,储层裂缝方位角范围为 0° ~ 180° 变化.垂向纵波速度顺裂缝方向传播几乎没有改变,水平纵波速度垂直裂缝方向传播呈先增大后减小趋势;垂向横波速度呈先减小后增大趋势,水平、垂向横波速度在 $\varphi = 90^\circ$ 处对称,水平横波速度在 $\varphi = 45^\circ$ 时出现最大值,说明此方位横向传播的横波能量最强,Thomsen 各向异性参数有不同程度的改变.提取 PP、PS 波的不同偏移距的振幅数据得到振幅随裂缝方位角变化 AVO 曲线,如图 17 所示.表 9 小结了 PP 波同裂缝方位角时,AVAz 响应特征表现为振幅幅度近偏强远偏弱;在 $\varphi = 90^\circ$ 处,即波的传播方向顺裂缝传播时,波阻抗差异的影响,导致振幅最小,两侧 AVAz 响应特征对称;对于 PS 波同裂缝方位角时,AVAz 响应特征表现为振幅幅度近偏弱远偏强;如图 18 所示,(a)、(b)、(c) 分别是方位角 0° 的 X、Y、Z 分量炮记录,(d)、(e)、(f) 分别是方位角 30° 的 X、Y、Z 分量炮记录,Y 分量炮记录说明了方位角的存在会出现横波分裂的现象.

表 9 振幅随裂缝方位角变化的 AVAz 特征
Table 9 AVAz characteristics of amplitude variation with fracture azimuth

波型	自有特征	共有特征
PP	同裂缝方位角时,PP 波 AVAz 特征表现为振幅幅度近偏强远偏弱的特征;PP 波在 $\varphi = 90^\circ$,即波的传播方向顺裂缝传播时,两侧 AVAz 特征对称	无
PS	同裂缝方位角时,PS 波 AVAz 特征表现为振幅幅度近偏弱远偏强的特征;方位角的存在会出现横波分裂现象	

3.6.2 振幅随储层裂缝方位角变化的敏感性分析

近偏入射角 10° 的 PP、PS 波振幅响应曲线,如图 19 所示,裂缝方位角对 PP、PS 波振幅影响基于 $\varphi = 90^\circ$ 对称,在致密背景的基础上,裂缝方位角为 90° 时地震波顺裂缝传播,因此以裂缝方位角 90° 为基准,由基准标准化的梯度曲线可见裂缝方位角对 PS 波振幅的影响更大.

3.7 孔-缝综合储层响应特征分析

设置储层厚度 100 m,裂缝方位角 0°、裂缝倾角 90°、含水饱和度 50%,改变裂缝密度 0.01 ~ 0.13、孔隙度 0.01 ~ 0.21,进行正演,选用孔隙-裂缝模型敏

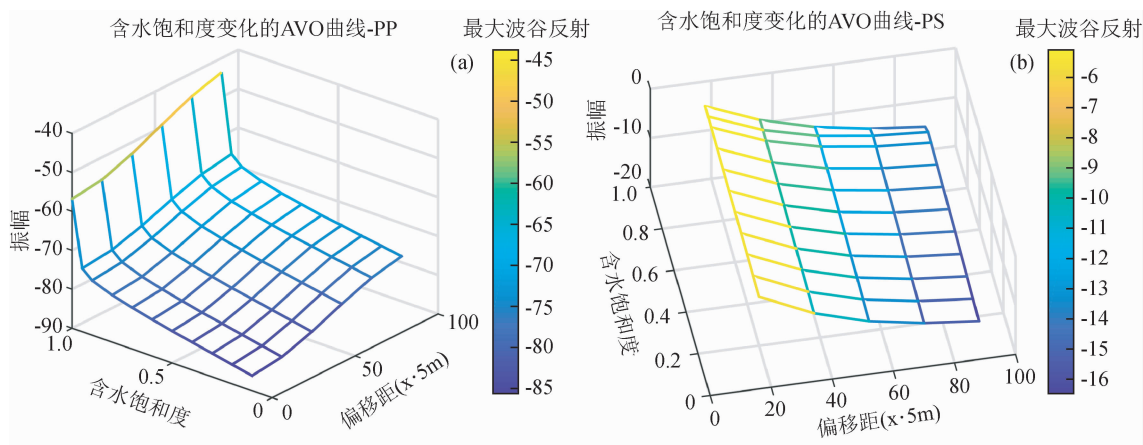


图 14 振幅随含水饱和度变化振幅曲线
(a) PP 波的储层含水饱和度变化 AVO 曲线;(b) PS 波的储层含水饱和度变化 AVO 曲线.

Fig. 14 Amplitude variation curves with water saturation

(a) AVO curve of PP-wave with reservoir water saturation variation;(b) AVO curve of PS-wave with reservoir water saturation variation.

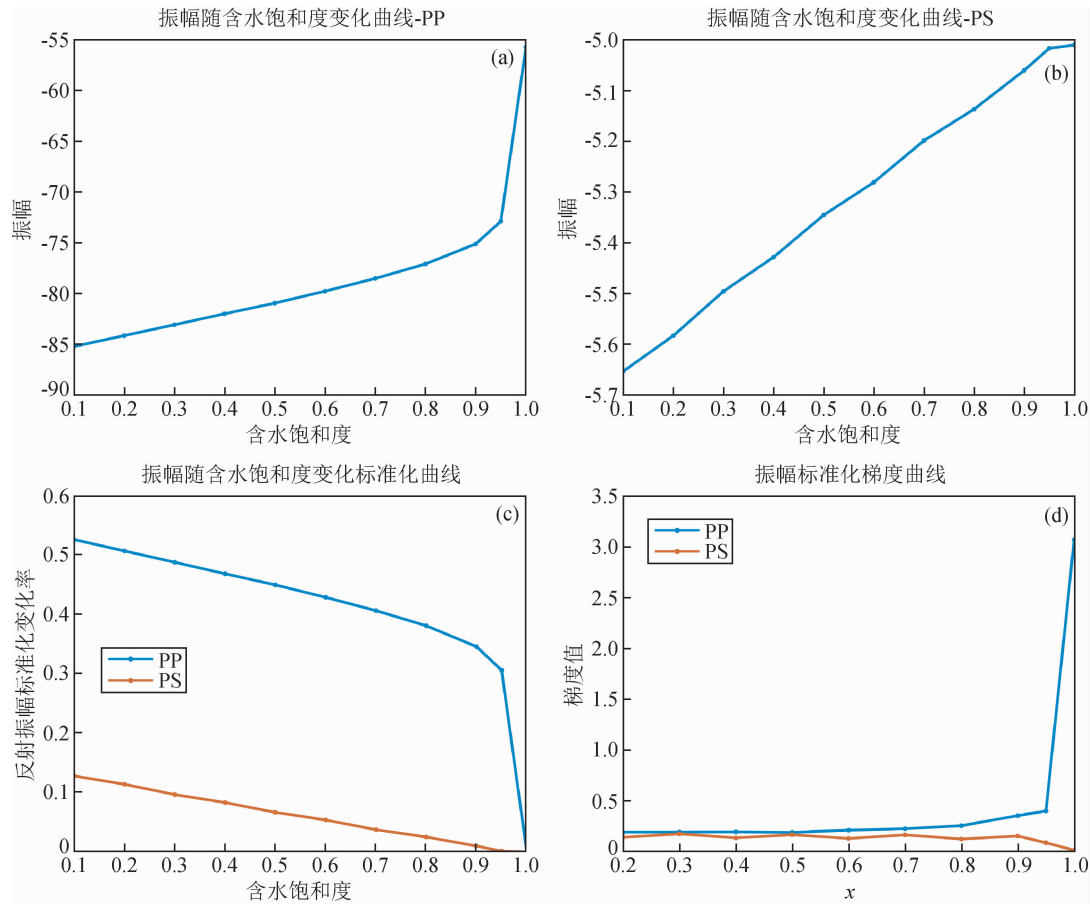


图 15 振幅随含水饱和度变化的响应、标准化和梯度曲线.

(a) PP 波振幅随含水饱和度变化曲线;(b) PS 波振幅随含水饱和度变化曲线;
(c) 振幅随含水饱和度变化标准化曲线;(d) 振幅标准化梯度曲线.

Fig. 15 Response, normalized, and gradient curves of amplitude variation with water saturation

(a) PP-wave amplitude variation curve with water saturation;(b) PS-wave amplitude variation curve with water saturation;
(c) Normalized amplitude curve with water saturation variation;(d) Normalized
amplitude gradient curve with water saturation variation.

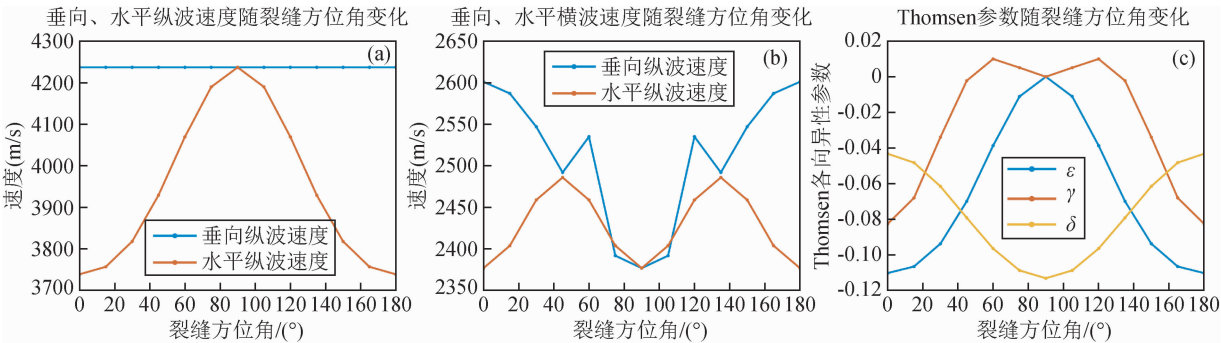


图 16 模型参数随裂缝方位角变化曲线

(a) 垂向、水平纵波速度随裂缝方位角变化曲线;(b) 垂向、水平横波速度随裂缝方位角变化曲线;
(c) Thomsen 各向异性参数随裂缝方位角变化曲线.

Fig. 16 Curves of model parameters with fracture azimuth variation

(a) Vertical and horizontal P-wave velocity variation curves with fracture azimuth;(b) Vertical and horizontal S-wave velocity variation curves with fracture azimuth;(c) Curves of Thomsen anisotropic parameters with fracture azimuth variation.

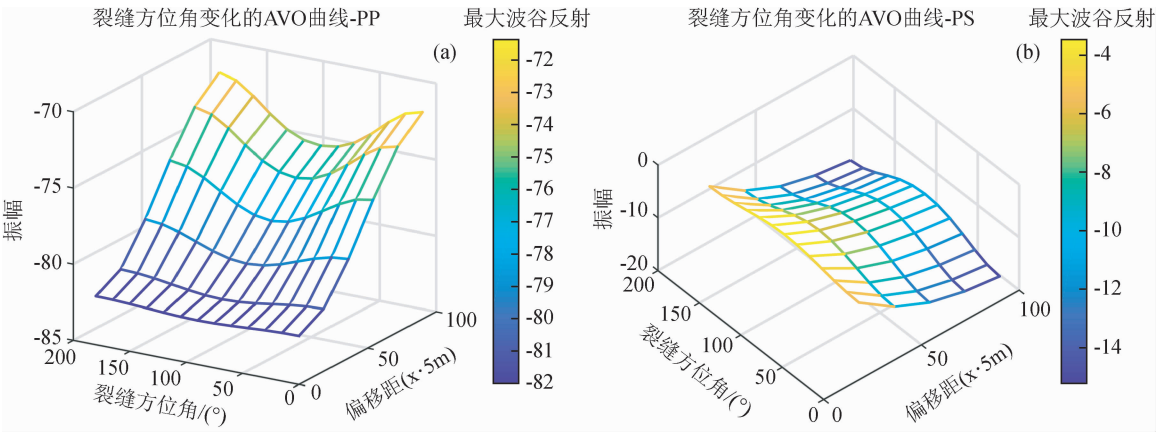


图 17 振幅随裂缝方位角变化曲线

(a) PP 波的储层裂缝方位角变化 AVO 曲线;(b) PS 波的储层裂缝方位角变化 AVO 曲线.

Fig. 17 Amplitude variation curves with fracture azimuth

(a) AVO curve of PP-wave with reservoir fracture azimuth variation;
(b) AVO curve of PS-wave with reservoir fracture azimuth variation.

感的近偏记录进行响应特征分析. 顶界面反射振幅随孔隙度、裂缝密度参数变化如图 20 所示, 可以将其分为 4 类: 致密储层(Ⅰ类)、裂缝型储层(Ⅱ类)、典型孔隙-裂缝型储层(Ⅲ类)和孔隙型储层(Ⅳ类).

从整体上, 孔隙度变化对 PP、PS 波的振幅幅度变化影响更大. 致密储层区域, 孔隙度和裂缝密度的对振幅幅度的影响较小; 典型孔隙-裂缝型储层区域, 孔隙度和裂缝密度的对振幅幅度的影响较大, 裂缝、孔隙均对储集空间有较大贡献; 而裂缝型储层、

孔隙型储层区域, 孔隙度和裂缝密度的对振幅幅度的影响居于前两者之间.

由于地震波在背景致密地层中传播本身也有 AVO 特征, 下面对背景 AVO 特征和孔隙、裂缝因素引起的 AVO 特征进行了分析, 如表 10 和图 21 所示.

综上所述, PP 波和 PS 波的致密背景层 AVO 特征与缝孔发育的 AVO 特征存在明显差异, 说明 PP 波和 PS 波振幅响应可用于指示裂缝和孔隙储集空间.

表 10 PP 波和 PS 波的致密背景层 AVO 特征与孔缝发育的 AVO 特征差异

Table 10 Differences in AVO characteristics between the dense background layer and porous-fractured development in PP and PS waves

波型	自有特征	共有特征
PP	孔缝发育层:裂缝密度不变时,孔隙度增加,AVO 特征单调递减变为单调递增的趋势;孔隙度不变时,裂缝密度增加,AVO 特征整体形态不变而振幅截距有微小变化	致密背景层:AVO 特征呈现单调递减的趋势
PS	孔缝发育层:裂缝密度不变时,孔隙度增加,AVO 特征整体形态不变而出现振幅梯度增加趋势;孔隙度不变时,裂缝密度增加,AVO 特征整体形态不变而出现振幅截距较 PP 波增加更多	

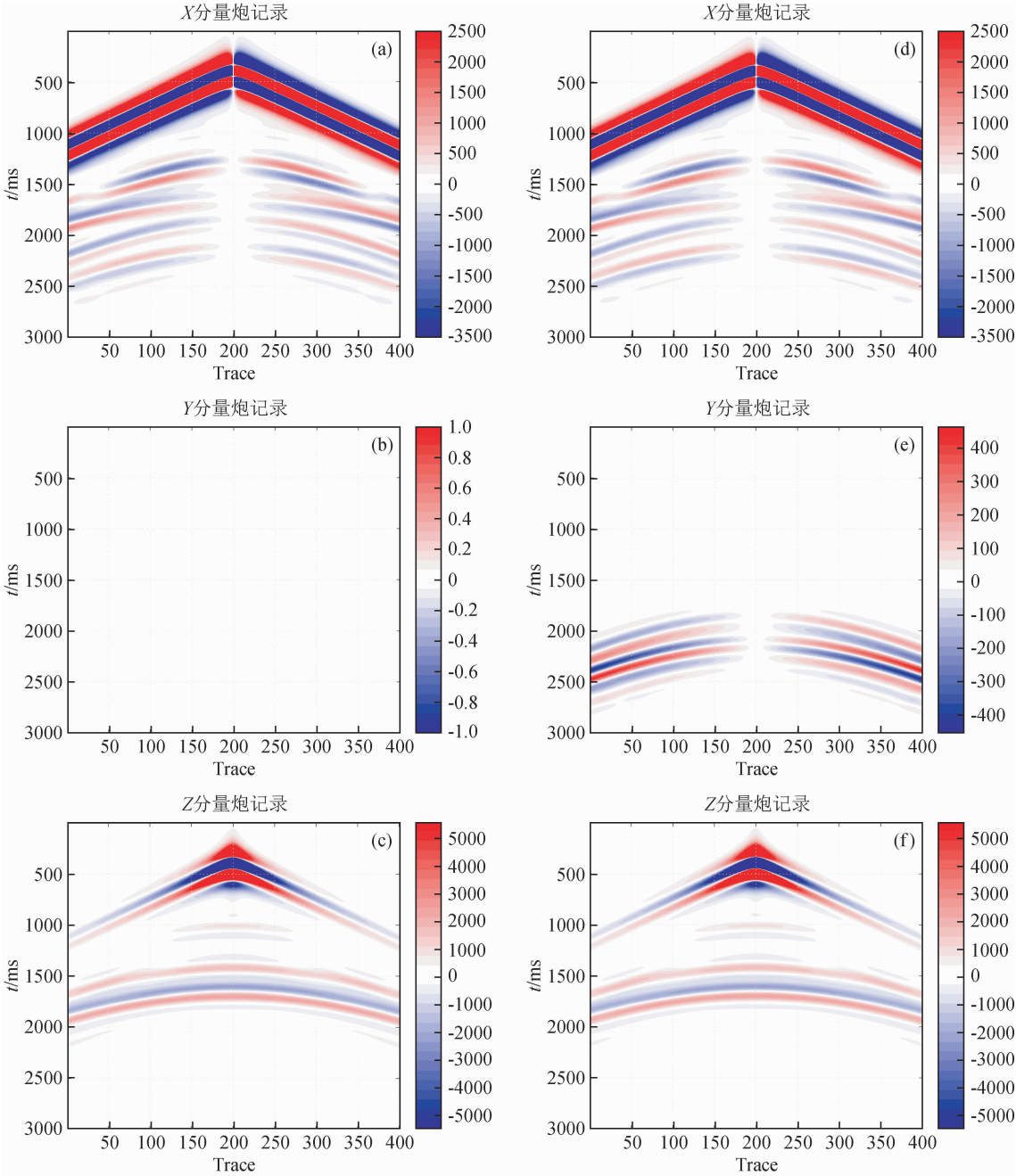


图 18 同裂缝方位角 PS 波的 X、Y、Z 分量炮记录

(a) $\varphi=0^{\circ}$ 的 X 分量炮记录; (b) $\varphi=0^{\circ}$ 的 Y 量炮记录; (c) $\varphi=0^{\circ}$ 的 Z 量炮记录; (d) $\varphi=30^{\circ}$ 的 X 分量炮记录; (e) $\varphi=30^{\circ}$ 的 Y 分量炮记录; (f) $\varphi=30^{\circ}$ 的 Z 分量炮记录.

Fig. 18 Shot records of the X, Y, and Z components of PS waves in the same fracture azimuth

(a) X-component shot record at $\varphi=0^{\circ}$; (b) Y-component shot record at $\varphi=0^{\circ}$; (c) Z-component shot record at $\varphi=0^{\circ}$; (d) X-component shot record at $\varphi=30^{\circ}$; (e) Y-component shot record at $\varphi=30^{\circ}$; (f) Z-component shot record at $\varphi=30^{\circ}$.

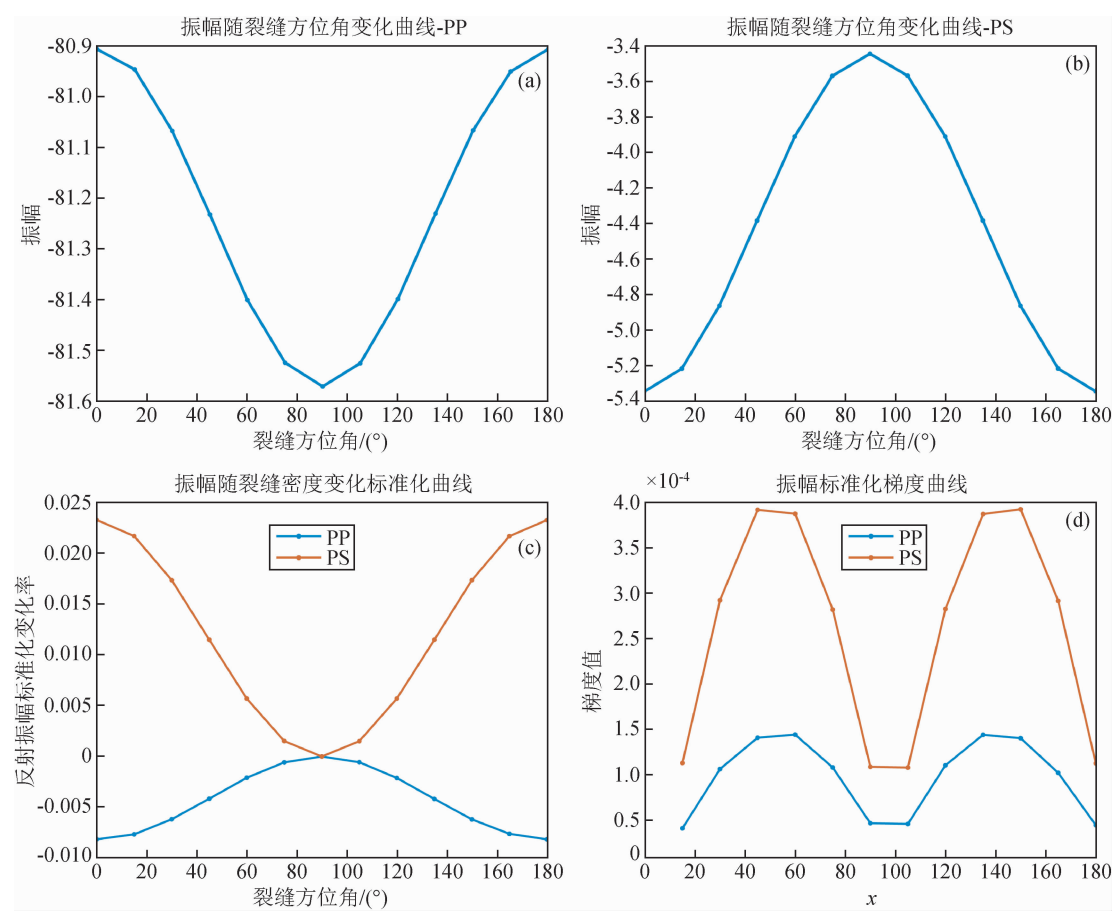


图 19 振幅随裂缝方位角变化的响应、标准化和梯度曲线
(a) PP 波振幅随裂缝方位角变化曲线;(b) PS 波振幅随裂缝方位角变化曲线;
(c) 振幅随裂缝方位角变化标准化曲线;(d) 振幅标准化梯度曲线.

Fig. 19 Response, normalized, and gradient curves of amplitude variation with fracture azimuth

(a) Amplitude variation curve of PP-wave with fracture azimuth;(b) Amplitude variation curve of PS-wave with fracture azimuth;
(c) Normalized amplitude curve with fracture azimuth variation;(d) Normalized amplitude gradient curve with fracture azimuth variation.

4 孔隙-裂缝型储层地震响应特征的实际解释意义

实际地震数据是复杂的,解释意义具有多解性,

尽管本文利用了孔隙-裂缝型储层模型有限的变化情况进行了正演响应特征分析,已能呈现一些对实际资料解释新的参考意义,见表 11.

表 11 孔隙-裂缝型储层地震响应特征对实际资料解释的意义

Table 11 The significance of seismic response characteristics of pore-fracture type reservoirs for the interpretation of actual data

特征	地震资料解释指导意义
PS 波的调谐厚度特征	在常用纵波和横波工程观测条件下,即主频比约 1.4348,速度比 [1.72,1.94] 范围内,两者调谐厚度基本一致,表明可联合应用最强的调谐振幅来共同约束调谐厚度解释;也有助于关注多波对岩性、物性差异的反映。

续表 11

Continued Table 11

特征	地震资料解释指导意义
近偏 PP 波对裂缝密度变化更敏感	指出利用近偏 PP 波资料可更好地反映孔隙度和裂缝密度的变化情况
近偏 PP 波对孔隙度变化更敏感	
远偏 PS 波对裂缝密度变化更敏感	指出利用远偏 PS 波资料可更好地反映孔隙度和裂缝密度的变化情况
远偏 PS 波对孔隙度变化更敏感	
含水饱和度变化时振幅呈增大趋势,且存在振幅突变	指出含水饱和度在 90%~100% 范围内
随裂缝方位变化,PP、PS 波振幅呈周期变化	方位变化为较为明显的标志,非常有利于表征裂缝
孔隙度对 PP、PS 波振幅的影响远大于裂缝密度	指示了联合 PP、PS 波振幅的响应幅度可用于区分储层类型
PP 波和 PS 波的致密背景层 AVO 特征与孔缝发育的 AVO 特征存在明显差异	指示裂缝和孔隙储集空间

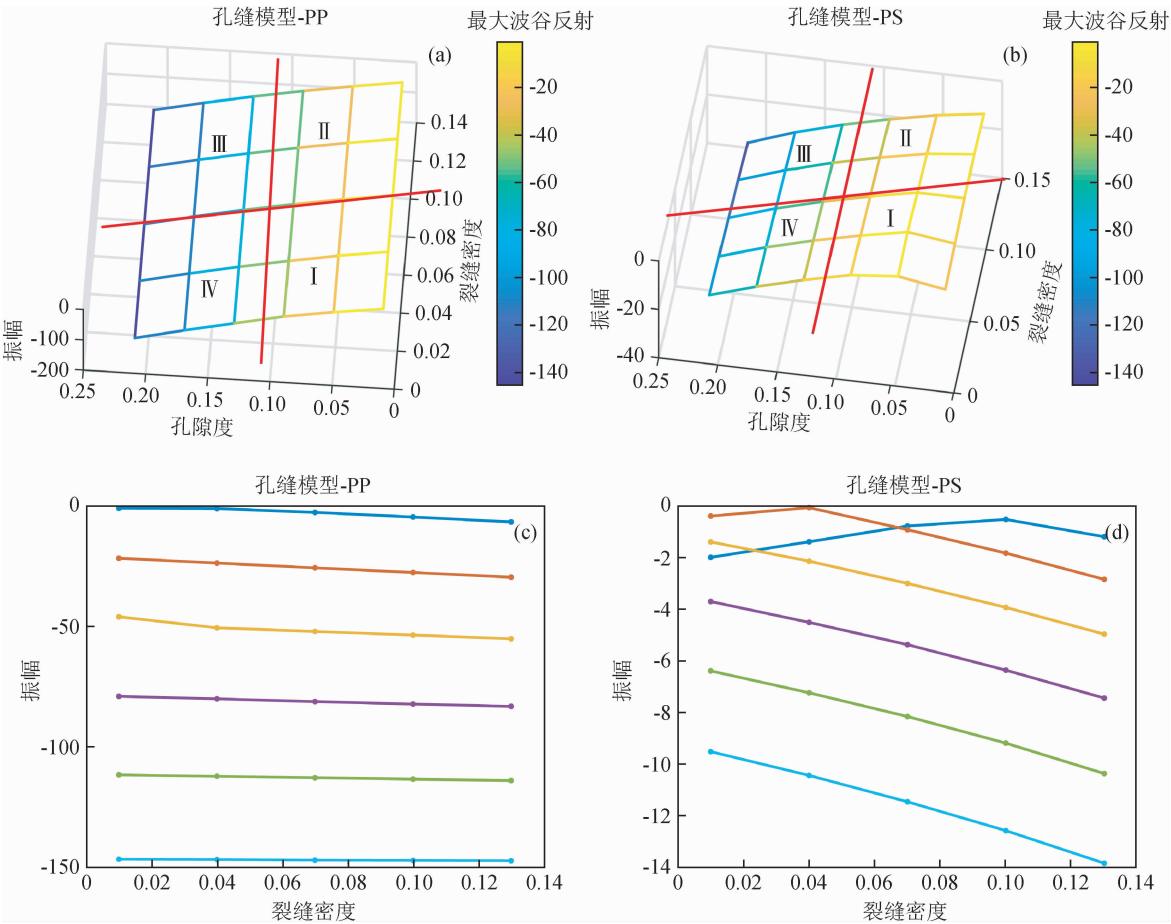


图 20 孔-缝模型振幅响应

(a) PP 波的孔-缝模型响应曲面;(b) PS 波的孔-缝模型响应曲面;(c) PP 波的孔-缝模型响应曲线;(d) PS 波的孔-缝模型响应曲线.

Fig. 20 Amplitude response of pore-fracture model

(a) Response surface of PP wave in pore-fracture model;(b) Response surface of PS wave in pore-fracture model;
(c) Response curve of PP wave in pore-fracture model;(d) Response curve of PS wave in pore-fracture model.

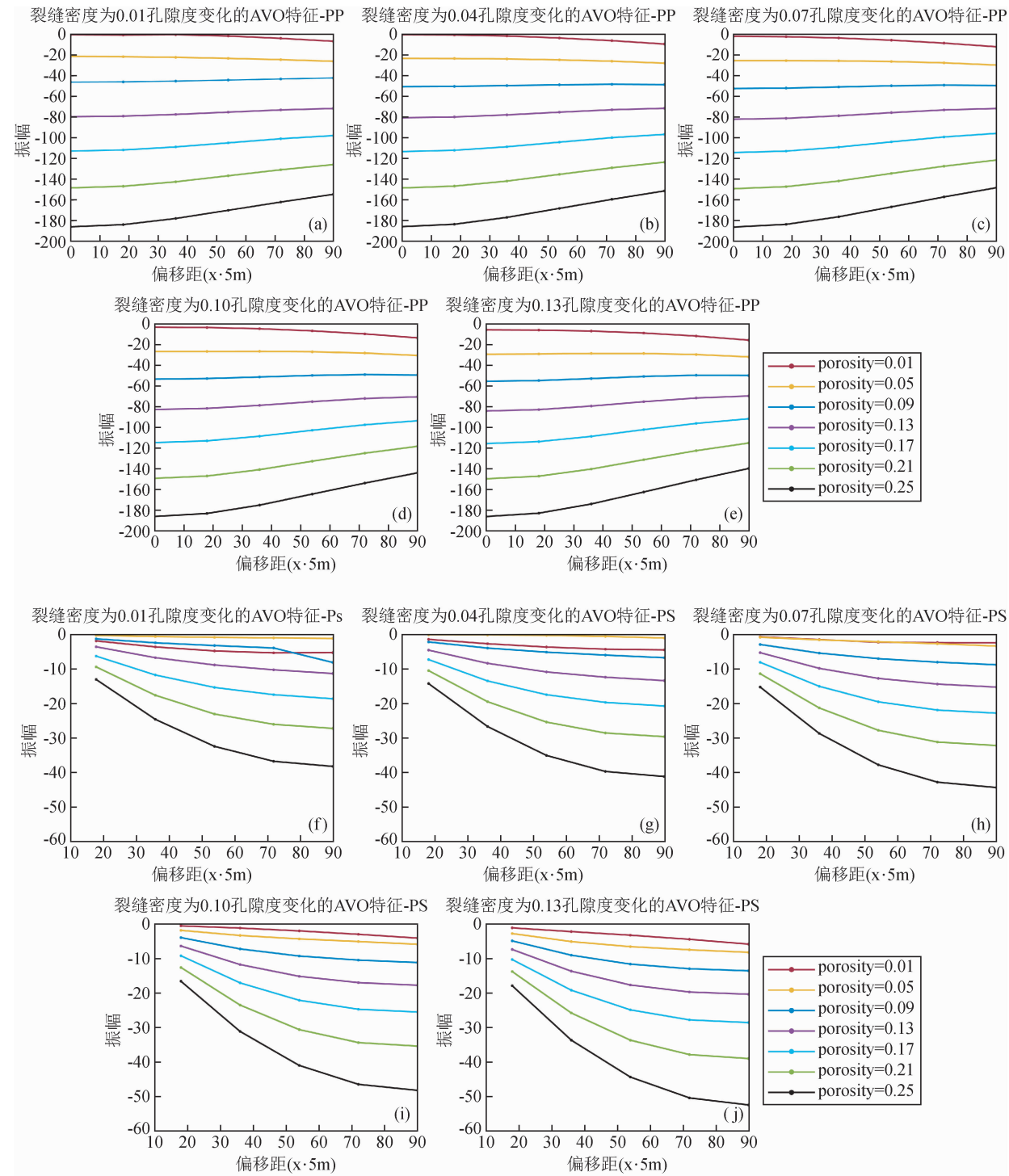


图 21 孔隙度和裂缝密度变化的 AVO 特征曲线

(a) PP 波的裂缝密度 0.01 孔隙度变化的 AVO 特征曲线;(b) PP 波的裂缝密度 0.04 孔隙度变化的 AVO 特征曲线;(c) PP 波的裂缝密度 0.07 孔隙度变化的 AVO 特征曲线;(d) PP 波的裂缝密度 0.10 孔隙度变化的 AVO 特征曲线;(e) PP 波的裂缝密度 0.13 孔隙度变化的 AVO 特征曲线;(f) PS 波的裂缝密度 0.01 孔隙度变化的 AVO 特征曲线;(g) PS 波的裂缝密度 0.04 孔隙度变化的 AVO 特征曲线;(h) PS 波的裂缝密度 0.07 孔隙度变化的 AVO 特征曲线;(i) PS 波的裂缝密度 0.10 孔隙度变化的 AVO 特征曲线;(j) PS 波的裂缝密度 0.13 孔隙度变化的 AVO 特征曲线。

Fig.21 AVO characteristic curves with porosity and fracture density variation

(a) AVO characteristic curve of PP wave with fracture density of 0.01 and porosity variation;(b) AVO characteristic curve of PP wave with fracture density of 0.04 and porosity variation;(c) AVO characteristic curve of PP wave with fracture density of 0.07 and porosity variation;(d) AVO characteristic curve of PP wave with fracture density of 0.10 and porosity variation;(e) AVO characteristic curve of PP wave with fracture density of 0.13 and porosity variation;(f) AVO characteristic curve of PS wave with fracture density of 0.01 and porosity variation;(g) AVO characteristic curve of PS wave with fracture density of 0.04 and porosity variation;(h) AVO characteristic curve of PS wave with fracture density of 0.07 and porosity variation;(i) AVO characteristic curve of PS wave with fracture density of 0.10 and porosity variation;(j) AVO characteristic curve of PS wave with fracture density of 0.13 and porosity variation.

5 结 论

本文针对孔隙-裂缝复合结构的储层,结合 Gassmann 方程各向异性流体替换理论和 Thomsen 各向异性理论,构建了孔隙-裂缝介质模型,进行了弹性波正演模拟,分析了多波响应特征,获得了以下认识:

(1)结合 Gassmann 方程各向异性流体替换理论和 Thomsen 各向异性理论,构建更加贴近实际地质条件的储层模型,可更好地表达孔隙-裂缝型储层的物性特征.

(2)应用了 2.5D 交错网格有限差分法,进行了弹性波动方程正演,更加高效地模拟孔隙-裂缝储层在厚度、裂缝密度、裂缝方位角、孔隙度和含水饱和度地质条件变化的波场响应特征.

(3)推导了 PS 波调谐厚度的计算公式,分析了 PP 波、PS 波调谐厚度的关系,在常用主频比 1.4348,速度比 $[1.72, 1.94]$ 范围内,PP、PS 波的调谐厚度两者几乎相等.

(4)孔隙-裂缝型储层振幅响应特征:PP 波的近偏振幅对裂缝密度和孔隙度更敏感;PS 波的远偏振

幅对裂缝密度和孔隙度更敏感;含水饱和度在 90% 附近出现振幅突变的 Domenico 效应;不同偏移距的振幅随含水饱和度变化特征相似;PP 波 AVAz 响应特征表现为振幅幅度近偏强远偏弱,PS 波呈相反趋势.

(5)孔隙-裂缝型储层的正演模拟的响应分析的特征可以作为实际资料解释的参考依据.常规多波资料 PP、PS 波的调谐厚度基本一致,表明可以联合最强调谐振幅约束调谐厚度解释,也有助于关注多波对岩性、物性差异的反映;PP 波近偏振幅、PS 波远偏振幅对裂缝密度和孔隙度变化更敏感,可更好地反映两参数变化;含水饱和度在 90% 附近存在振幅突变现象;随裂缝方位角变化,PP、PS 波振幅呈周期性变化,可指示裂缝方位;孔隙-裂缝综合地震响应表明孔隙度对 PP、PS 波振幅的影响远大于裂缝密度,可联合 PP、PS 波振幅响应幅度区分储层类型;孔隙-裂缝储层的 PP 波和 PS 波 AVO 响应特征有别于致密背景层,可用于指示裂缝、孔隙储集空间.

下一步将结合实际资料,应用以上特征,开展孔隙-裂缝型储层高精度解释方法研究.

附录

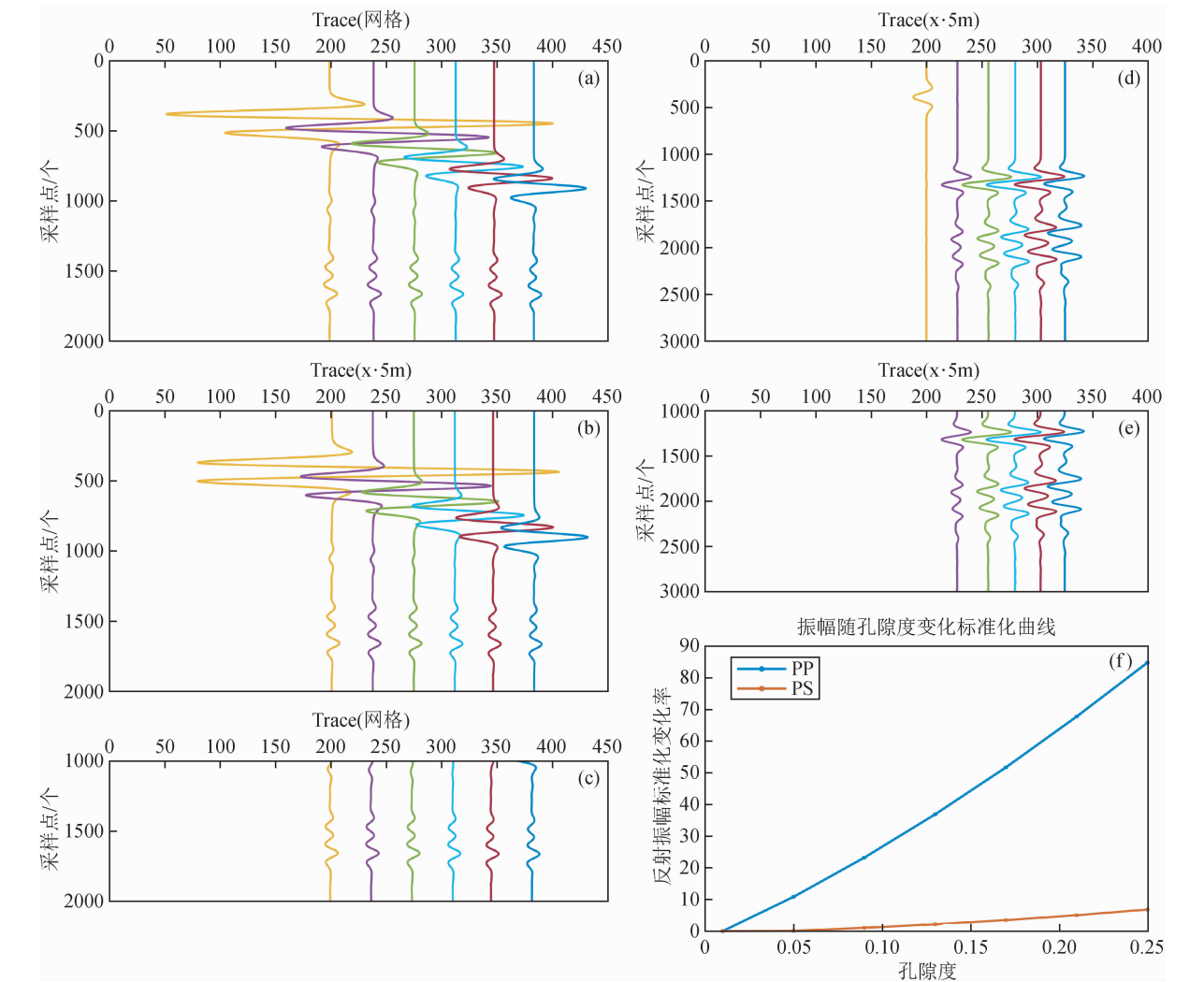


图 A1 模型数据预处理

- (a) PP 波储层厚度 100 m 模型的道集选择;(b) PP 波储层厚度 100 m 模型的相位处理;(c) PP 波储层厚度 100 m 模型的初至去除;
- (d) PS 波储层厚度 100 m 模型的道集选择;(e) PS 波储层厚度 100 m 模型的初至去除;
- (f) 孔隙度变化近偏振幅基准标准化(基准孔隙度为 0.01)。
- Fig. A1 Data preprocessing of the model
- (a) Shot gather selection for the PP wave reservoir model with a thickness of 100 m;(b) Phase processing for the PP wave reservoir model with a thickness of 100 m;(c) First-break removal for the PP wave reservoir model with a thickness of 100 m;(d) Shot gather selection for the PS wave reservoir model with a thickness of 100 m;(e) First-break removal for the PS wave reservoir model with a thickness of 100 m;
- (f) Near-offset amplitude normalization based on porosity variation (the reference porosity is 0.01) .

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Biot M A, Willis D G. 1957. The elastic coefficients of the theory of

consolidation. Journal of Applied Mechanics, 24(4) : 594-601.
Domenico S N. 1974. Effect of water saturation on seismic reflectivity of sand reservoirs encased in shale. Geophysics, 39(6) : 759-769, doi: 10.1190/1.1440464.
Fu W. 2016. Modeling and analysis of seismic wave AVO response from fractured reservoirs [Master's thesis] (in Chinese). Changchun: Jilin University.
Dou X Y, Wang E L, Yan G L, et al. 2017. The analysis on elastic impedance and generalized fluid factor in equivalent porous fracture media. Geophysical Prospecting for Petroleum, 56(2) : 192-202, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2017.02.005.

- Gassmann F. 1951. Über die elastizität proser mediem. Vierteljahrsschrift der Naturefor schenden Gesellschaft in Zurich, 96 (14): 1-23.
- Gurevich B. 2003. Elastic properties of saturated porous rocks with aligned fractures. Journal of Applied Geophysics, 54 (3-4): 203-218, doi: 10.1016/j.jappgeo.2002.11.002.
- Hua S B. 2016. The research of seismic rock physics model in saturated porous media [Master's thesis] (in Chinese). Qingdao: China University of Petroleum (East China).
- Jiang C H. 2021. Forward modeling of seismic anisotropy and its response characteristics [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Petroleum (Beijing).
- Li H M. 2013. AVO forward modeling and attenuation analysis based on porous viscoelastic media. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 52 (5): 464-474, doi: 10.3969/j. issn. 1000-1441.2013.05.004.
- Li J. 2014. The seismic response simulation and research on sandy reservoir model with the varying porosity. Chinese Journal of Engineering Geophysics (in Chinese), 11(4): 483-486, doi: 10.3969/j. issn. 1672-7940.2014.04.010.
- Li L Q. 2017. Numerical simulation of seismic wave fields in complex reservoirs of the Bohai submarine mountain [Master's thesis] (in Chinese). Chengdu: Chengdu University of Technology.
- Li Y G, Xu S F. 2008. Application of seismic rock physics and forward simulation in predicting tight sandstone reservoirs. Journal of Oil and Gas Technology (in Chinese), 30 (6): 61-65, doi: 10.3969/j. issn. 1000-9752.2008.06.011.
- Liu B H, Yang Q, Shi Z, *et al.* 2010. Azimuthal AVO simulation for HTI media. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 49(3): 232-239, doi: 10.3969/j. issn. 1000-1441.2010.03.004.
- Liu J S, Ding W L, Xiao Z K, *et al.* 2019. Advances in comprehensive characterization and prediction of reservoir fractures. Progress in Geophysics (in Chinese), 34 (6): 2283-2300, doi: 10.6038/pg2019CC0290.
- Liu S X, Li X M, Li Y G, *et al.* 2024. Rock physics modeling of fractured-porous shale reservoirs and petrophysical parameters prediction. Progress in Geophysics (in Chinese), 39 (2): 594-605, doi: 10.6038/pg2024HH0190.
- Lu J M, Wang Y G. 2011. Principle of Seismic Exploration (in Chinese). 3rd ed. Dongying: China University of Petroleum Press.
- Lu N, Liu C, Guo Z Q, *et al.* 2017. Modeling and analysis of anisotropic overburden effects on seismic AVAz from fractured reservoir. Global Geology (in Chinese), 36 (1): 283-292, doi: 10.3969/j. issn. 1004-5589.2017.01.028.
- Lu Y X. 2019. Time reverse migration based on curvilinear stagger-grid finite difference method for an undulated layered model [Master's thesis] (in Chinese). Xi'an: Chang'an University.
- Pan B. 2017. The study on wave field characteristics of fractured anisotropic model [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- Qin X Y. 2023. The research of seismic inversion and quantitative interpretation of tight gas sandstone reservoir parameters based on rock physical model [Ph. D. thesis] (in Chinese). Changchun: Jilin University.
- Schoenberg M. 1980. Elastic wave behavior across linear slip interfaces. The Journal of the Acoustical Society of America, 68 (5): 1516-1521, doi: 10.1121/1.385077.
- Schoenberg M, Sayers C M. 1995. Seismic anisotropy of fractured rock. Geophysics, 60(1): 204-211, doi: 10.1190/1.1443748.
- Shuai D, Wei J X, Di B R, *et al.* 2019. Physical modeling of the influence of crack density on the accuracy of effective medium theory. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 62(7): 2697-2710, doi: 10.6038/cjg2019M0303.
- Su Y. 2010. Forward simulation of elastic wave and analysis of wave field characteristics in anisotropic & two-phase medium [Ph. D. thesis] (in Chinese). Chengdu: Chengdu University of Technology.
- Thomsen L. 1986. Weak elastic anisotropy. Geophysics, 51(10): 1954-1966, doi: 10.1190/1.1442051.
- Wan X J. 2012. The study of complex reservoir's characteristics based on the forward modeling [Master's thesis] (in Chinese). Qingdao: Ocean University of China.
- Widess M B. 1973. How thin is a thin bed?. Geophysics, 38(6): 1176-1180, doi: 10.1190/1.1440403.
- Yang S, Lu J, Yang C. 2018. Multi-wave AVO responses in fractured tight sandstone. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 53(4): 798-804, doi: 10.13810/j. cnki. issn. 1000-7210.2018.04.018.
- Yuan Z Y. 2014. Seismic wave propagation characteristics in viscoelastic anisotropic fractured reservoirs [Master's thesis] (in Chinese). Qingdao: China University of Petroleum (East China).
- Zhang Y H. 2007. Research on AVO forward modeling based on rockphysics [Master's thesis] (in Chinese). Qingdao: China University of Petroleum (East China).
- Zhang Z Q, Yan W L, Song Y J, *et al.* 2024. Study on acoustic anisotropy correction method of shale based on staggered grid finite difference. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 67 (4): 1570-1582, doi: 10.6038/cjg2023Q0821.
- Zhong Y. 2016. Study of forward and inversion of wave equation and the seismic response characteristics of buried hill reservoirs [Master's thesis] (in Chinese). Chengdu: Chengdu University of Technology.

附中文参考文献

- 窦喜英,王恩利,闫国亮,等. 2017. 等效孔隙裂缝介质的弹性阻抗及广义流体因子分析. 石油物探, 56(2): 192-202, doi: 10.3969/j. issn. 1000-1441.2017.02.005.
- 符伟. 2016. 裂缝型储层地震波 AVO 响应及特征分析 [硕士论文]. 长春: 吉林大学.
- 化世榜. 2016. 含流体孔缝介质地震岩石物理模型研究 [硕士论文]. 青岛: 中国石油大学(华东).
- 蒋存浩. 2021. 地震各向异性正演及其响应特征研究 [硕士论文]. 北京: 中国石油大学(北京).
- 李红梅. 2013. 基于孔隙黏弹性介质的 AVO 正演模拟及衰减分析. 石油物探, 52(5): 464-474, doi: 10.3969/j. issn. 1000-1441.2013.05.004.
- 李键. 2014. 砂岩储层模型孔隙度变化条件下地震响应特征模拟与研究. 工程地球物理学报, 11(4): 483-486, doi: 10.3969/j. issn. 1672-7940.2014.04.010.
- 李良泉. 2017. 渤海潜山复杂储层地震波场数值模拟研究 [硕士论文]. 成都: 成都理工大学.
- 李勇根,徐胜峰. 2008. 地震岩石物理和正演模拟技术在致密砂岩储层预测中的应用研究. 石油天然气学报, 30(6): 61-65, doi: 10.3969/j. issn. 1000-9752.2008.06.011.
- 刘百红,杨强,石展,等. 2010. HTI 介质的方位 AVO 正演研究. 石油物探, 49(3): 232-239, doi: 10.3969/j. issn. 1000-1441.2010.03.004.
- 刘敬寿,丁文龙,肖子亢,等. 2019. 储层裂缝综合表征与预测研究进展. 地球物理学进展, 34(6): 2283-2300, doi: 10.6038/pg2019CC0290.
- 刘姝娴,李晓明,李勇根,等. 2024. 裂缝-孔隙型页岩气储层岩石物理建模及物性参数预测. 地球物理学进展, 39(2): 594-605, doi: 10.6038/pg2024HH0190.
- 陆基孟,王永刚. 2011. 地震勘探原理. 3 版. 东营: 中国石油大学出版社.
- 陆能,刘财,郭智奇,等. 2017. 各向异性上覆层对裂缝储层地震 AVAz 影响的模拟及分析. 世界地质, 36(1): 283-292, doi: 10.

3969/j. issn. 1004-5589. 2017. 01. 028.

鲁雁翔. 2019. 曲线交错网格有限差分起伏层状介质中弹性波场逆时偏移成像[硕士论文]. 西安: 长安大学.

潘博. 2017. 裂缝性各向异性模型的多波响应分析[硕士论文]. 北京: 中国地质大学(北京).

秦小英. 2023. 基于岩石物理模型的致密砂岩气储层参数地震反演与定量解释研究[博士论文]. 长春: 吉林大学.

帅达, 魏建新, 狄帮让, 等. 2019. 等效介质理论中裂缝密度的适用性研究. 地球物理学报, 62 (7): 2697-2710, doi: 10. 6038/cjg2019M0303.

苏云. 2010. 各向异性及双相介质弹性波正演模拟与波场特征分析[博士论文]. 成都: 成都理工大学.

万秀娟. 2012. 基于正演模拟的复杂储层特征研究[硕士论文]. 青岛: 中国海洋大学.

杨帅, 芦俊, 杨春. 2018. 含裂缝致密砂岩多波 AVO 响应分析. 石油地球物理勘探, 53 (4): 798-804, doi: 10. 13810/j. cnki. issn. 1000-7210. 2018. 04. 018.

袁振宇. 2014. 黏弹性各向异性裂缝性储层地震波场传播特征研究[硕士论文]. 青岛: 中国石油大学(华东).

张玉华. 2007. 基于岩石物理的 AVO 正演模拟研究[硕士论文]. 青岛: 中国石油大学(华东).

张兆谦, 闫伟林, 宋延杰, 等. 2024. 基于交错网格有限差分算法的页岩声波各向异性校正方法研究. 地球物理学报, 67 (4): 1570-1582, doi: 10. 6038/cjg2023Q0821.

钟雨. 2016. 波动方程正反演及潜山储层地震响应特征研究[硕士论文]. 成都: 成都理工大学.