

基于反射率法正演模拟的含气储层反射系数频变规律研究

蒯正杨¹, 梁 锴¹, 张世鑫², 韩文明², 曹丹平¹

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;

2. 中国海洋石油国际有限公司, 北京 100028)

摘要:振幅随偏移距/入射角的变化(AVO/AVA)技术已在油气勘探中广泛应用,其随频率的变化特征对岩性研究、储层预测和油气检测具有重要的指示作用。频变特征不仅与含气储层自身吸收衰减产生的速度频散有关,还与地震波在储层顶底之间发生的多次反射有关。本研究基于反射率法建立层状介质的频变反射系数递推公式,利用 Chapman 模型引入频散速度,提出一种充分考虑含气储层本身吸收衰减与层状结构的 AVO 精细模拟方法。并在此基础上深入分析了含气储层的厚度、含气饱和度、孔隙度及渗透率与频变反射系数之间的关系,为采用频变规律开展含气储层识别提供了依据。

关键词:含气储层;速度频散;多次反射;反射率法;频变反射系数;Chapman 模型

中图分类号:P631.4

文献标志码:A

Research on frequency variation law of reflection coefficient of gas reservoir based on forward modeling with reflectivity method

KUAI Zhengyang¹, LIANG Kai¹, ZHANG Shixin², HAN Wenming², CAO Danping¹

(1. College of Earth Science and Technology, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. CNOOC International Limited, Beijing 100028, China)

Abstract: Amplitude variation with offset/incident angle (AVO/AVA) has been widely used in oil and gas exploration, and its variation characteristics with frequency play an important indicative role in the study of lithology, reservoir prediction and gas and oil detection. The frequency variation characteristics are not only related to the velocity dispersion caused by the absorption and attenuation of the gas reservoir itself, but also related to the multiple reflections of seismic waves between the top and bottom of the reservoir. In this study, the recurrence formula of frequency-varying reflection coefficient of layered media was established based on the reflectivity method. By using Chapman model, the dispersion velocity was introduced and an AVO fine simulation method that fully considering the absorption and attenuation and layered structure of gas reservoir itself was formed. Finally, the relationship between the thickness, gas saturation, porosity, permeability of the gas reservoir and the frequency-varying reflection coefficient was deeply analyzed. This study provides a basis for using frequency variation law to identify gas reservoir.

Key words: gas reservoir; velocity dispersion; multiple reflections; reflectivity method; frequency-varying reflection coefficient; Chapman model

收稿日期:2023-07-23

基金项目:国家自然科学基金项目(42325403,42074162);崂山国家实验室科技创新项目(LSKJ202203400)

作者简介:蒯正杨(1998—),男,安徽合肥人,博士研究生,主要从事油气储层地球物理的研究。

曹丹平(1978—),男,四川宜宾人,教授,博士生导师,主要从事油气储层地球物理领域的教学科研工作,本文通信作者。E-mail:caodp@upc.edu.cn

振幅随偏移距/入射角的变化(amplitude variation with offset/ incident angle, AVO/AVA)技术通过研究反射振幅的变化规律进行地下介质参数的估计,是岩性研究、储层预测以及油气检测的重要技术。AVO研究一般建立在界面两侧弹性参数差异较小的情况下,基于 Zoeppritz 方程或其各种近似公式开展^[1-2]。地下介质是分层的,此时单界面的 Zoeppritz 方程及近似公式在解决实际的分层介质时常忽略地震波在层状介质之间的多次反射问题。而反射率法是一种基于平面波理论对层状介质地震波场进行正演模拟的方法,利用传播矩阵可精确模拟层状介质中的各种传播效应,更真实地反映实际地震道集中复杂的波场混叠效应,为储层精细研究提供理论基础^[3]。Liu 等^[4]通过导出解析解模拟反射振幅,并分析单薄层中任意入射角的反射幅度和 AVO 响应,认为对于较薄的含气储层,考虑单薄层顶底干涉的 AVO 响应更接近实际地震资料。张恩珂等^[5]在薄层反射波理论基础上,充分利用波形、振幅和频率等多种地震属性随煤层厚度的变化规律,在频率域实现煤层厚度的精细定量预测。

振幅随入射角变化的同时也会随着频率发生改变,原因是层间多次反射和含气储层的能量衰减与速度频散。而通过反射率法模拟层间的多次反射更能反映频变响应规律。Pan 等^[6]分析了不同入射角、频率和薄层厚度对振幅响应的影响,明确了层厚减小的振幅响应相当于频率增加的振幅响应。Yang 等^[7]推导了以位移定义的薄层反射和透射系数近似方程,该方程保留所有波模式和多次反射信息,并通过薄层厚度和测井曲线的地震响应讨论了近似方程的精度。Foster 等^[8]采用波恩散射级数方法讨论了传输损耗、转换波和层间多次反射的波传播现象,并通过煤层传播展示了散射引起的时间延迟。Kumar 等^[9]建立了适用于储层表征的频率相关振幅随偏移距的变化(frequency-dependent amplitude variation with offset,FAVO)模型,指出地震波在层间传播时的时间延迟导致 AVO 响应随频率发生改变,该模型比单界面的 AVO 响应具有更丰富的信息。然而上述研究均忽略了含气储层对 AVO 响应的影响。

储层含气时会发生速度频散和能量衰减,因此 AVO 响应与频率相关。Chapman 等^[10]提出可预测地震频带的速度频散与能量衰减的多尺度孔隙和裂缝模型,认为在进行流体替代时需考虑流体黏度效应。秦喜林^[11]认为致密砂岩储层存在的部分饱和与定向裂缝两种衰减现象,是导致地震波产生速度频散和能量衰减的主要因素。Guo 等^[12]在 Chapman 模型的基础上,提出通过联合岩石物理建模和传播矩阵方法,计算层状介质中含有速度频散和能量衰减时的频率相关反射系数。逢硕^[13]利用 Chapman 模型对页岩气储层进行岩石物理建模,分析了储层的速度频散和衰减特征对流体类型的敏感性,为页岩储层含气性识别提供了依据。Jin 等^[14]将混合流体黏度引入 Chapman 模型,探讨了不同含气饱和度的纵波速度频散、衰减特征及频变响应。He 等^[15]将频域中的传播矩阵算法和可预测各向异性弹性刚度张量的岩石物理模型联系起来,获得频率相关的 PP 波和 PS 波反射系数及其合成地震记录,探讨了具有速度频散的层状储层中的反射异常。但上述研究均未考虑储层分层以及储层内砂岩与围岩的比例等对频变反射系数的影响。

本研究针对储层间多次反射以及储层含气时的能量衰减和速度频散,基于 Chapman 模型分析含气饱和度、孔隙度和渗透率对速度频散和衰减的影响,结合反射率法构建有无速度频散衰减的单界面模型和有无速度频散衰减的层状模型四种储层模型,分析对反射系数频变规律的影响,同时探讨了含气饱和度、孔隙度和渗透率以及储层厚度、储层内砂岩与围岩的比例和分层情况对储层反射系数频变特征的影响。

1 基于 Chapman 模型的含气储层的速度及衰减因子频散特征

1.1 Chapman 模型

Chapman 等^[10]考虑了岩石中微观尺度的孔隙、微裂缝和介观尺度的裂缝,提出了含流体裂缝孔隙介质的多尺度岩石物理模型,可准确预测地震频带内的速度频散与衰减现象,并给出等效刚度矩阵表达式:

$$C_{ijkl} = C_{ijkl}^0 - \varphi_p C_{ijkl}^1 - \varepsilon_c C_{ijkl}^2 - \varepsilon_f C_{ijkl}^3 \quad (1)$$

式中: C_{ijkl}^0 表示各向同性弹性刚度矩阵,与拉梅常数有关, $ijkl$ 为矩阵 C 元素的索引下标; C_{ijkl}^1 、 C_{ijkl}^2 和 C_{ijkl}^3 均为与拉梅常数、流体和裂缝弹性参数、频率以及流体弛豫时间有关的函数,分别对应裂缝孔隙介质的孔隙度 φ_p 、微裂缝密度 ε_c 和裂缝密度 ε_f 引起的刚度矩阵修正项。Chapman 模型中的流体流动存在微观和介观两种尺度,分别对应 τ_f 和 τ_m 两种松弛时间,较大的 τ_f 导致地震频带出现速度频散和能量衰减。

根据式(1)计算得到等效刚度矩阵 $C_{ijkl}(\omega)$, 联合含气储层中饱和岩石的密度 ρ_s 可计算频变纵波速度 $V_p(\omega)$ 和衰减因子 $\frac{1}{Q(\omega)}$, 由于刚度矩阵中的系数均为复数, 求出来的复相速度需转化为有效速度:

$$V_p(\omega) = \left[\text{Re}\left(\frac{1}{V}\right) \right]^{-1}, V = \sqrt{\frac{C_{3333}(\omega)}{\rho_s}}, \tag{2}$$

$$\frac{1}{Q(\omega)} = \frac{\text{Im}(C_{3333}(\omega))}{\text{Re}(C_{3333}(\omega))} \tag{3}$$

式中: $C_{3333}(\omega)$ 为等效频率相关刚度系数, ω 为角速度, V 为复相速度, Im 和 Re 分别为复刚度系数的虚部和实部。

1.2 含气饱和度、孔隙度和渗透率对速度频散和衰减的影响

研究含气饱和度的影响时需考虑流体混合的问题, 当储层中含有盐水和气体的双相流体时, 混合流体的黏度对速度和衰减随频率的变化规律有影响^[14]。含有盐水和气体的双相流体的黏度为:

$$\eta = \eta_g \left(\frac{\eta_w}{\eta_g} \right)^{1-S_g}, \tag{4}$$

式中: η 为混合流体的黏度, η_w 为盐水的黏度, η_g 为气体的黏度, S_g 为含气饱和度。含气饱和度不同, 混合流体和流体饱和岩石的密度也会发生改变:

$$\rho_f = S_g \rho_g + (1 - S_g) \rho_w, \tag{5}$$

$$\rho_s = \varphi_p \rho_f + (1 - \varphi_p) \rho_m. \tag{6}$$

式中: ρ_f 为混合流体的密度, ρ_g 为气体的密度, ρ_w 为盐水的密度, φ_p 为孔隙度, ρ_m 为固体骨架的密度。

混合流体的体积模量 K_f 和速度 V_f 采用 Wood 方程计算:

$$K_f = \frac{1}{\frac{S_g}{K_g} + \frac{1-S_g}{K_w}}, \tag{7}$$

$$V_f = \sqrt{\frac{K_f}{\rho_f}}. \tag{8}$$

式中: K_g 为气体的体积模量, K_w 为盐水的体积模型。结合 Chapman 模型和本研究储层模型参数, 设置模型中的弹性参数如表 1 所示。

表 1 Chapman 模型的参数设置

Table 1 Parameters setting of Chapman model

性质	符号	数值	单位	性质	符号	数值	单位
P 波速度	V_p	4 300	m/s	裂缝纵横比	r	1×10^{-4}	—
S 波速度	V_s	2 600	m/s	孔隙半径	a	2×10^{-4}	m
密度	ρ	2 500	kg/m ³	渗透率	κ	0.1	mD
参考频率	f	40	Hz	盐水声速	V_w	1 710	m/s
孔隙度	φ_p	0.05	—	盐水密度	ρ_w	1 100	kg/m ³
微裂缝密度	ϵ_c	0	—	盐水黏度	η_w	1×10^{-3}	Pa·s
裂缝密度	ϵ_f	0.05	—	气体声速	V_g	620	m/s
裂缝半径	a_f	0.5	m	气体密度	ρ_g	65	kg/m ³
颗粒尺寸	ζ	2×10^{-4}	m	气体黏度	η_g	2×10^{-5}	Pa·s

通过表 1 参数和式(1)得到等效频率相关刚度系数 $C_{3333}(\omega)$, 再根据式(2)、式(3)开展含气储层的能量衰减和速度频散研究。纵波垂直入射时储层不同含气饱和度对应的纵波速度和衰减随频率变化规律如图 1 所示, 不同颜色的曲线代表不同含气饱和度。由图 1 可以看出, 在 seismic 频带内该模型的纵波速度频散和衰减

明显,且纵波速度随频率的增加而增加。饱和盐水中混入少量气体引起速度频散和衰减的幅度发生突变,但纵波速度频散和衰减峰值对应的特征频率未改变;随着含气饱和度的不断增加,其特征频率向高频移动。

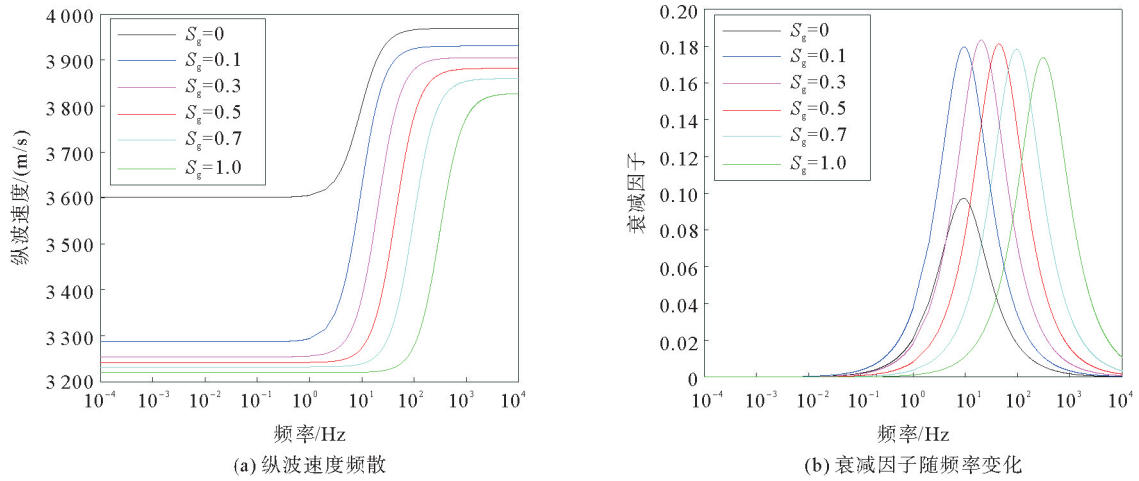


图 1 不同含气饱和度时纵波速度和衰减因子随频率变化规律

Fig. 1 Variation of P-wave velocity and attenuation factor with frequency at different gas saturation

除含气饱和度外,孔隙度和渗透率对纵波速度和衰减随频率的变化规律也有一定影响。图 2 和图 3 展示了储层完全含气时,不同孔隙度和渗透率的纵波速度和衰减因子随频率变化规律。由图 2 可以看出,孔隙度对速度频散和衰减幅度影响较大,但不会影响纵波速度频散和衰减峰值对应的特征频率,孔隙度越小,流通气体越少,饱和岩石的纵波速度也随之增大。由图 3 可以看出,渗透率对速度频散和衰减的影响仅限于其特征频率,而对速度频散和衰减的幅值并无影响,当渗透率增大时,纵波速度频散和衰减峰值对应的特征频率向高频移动。

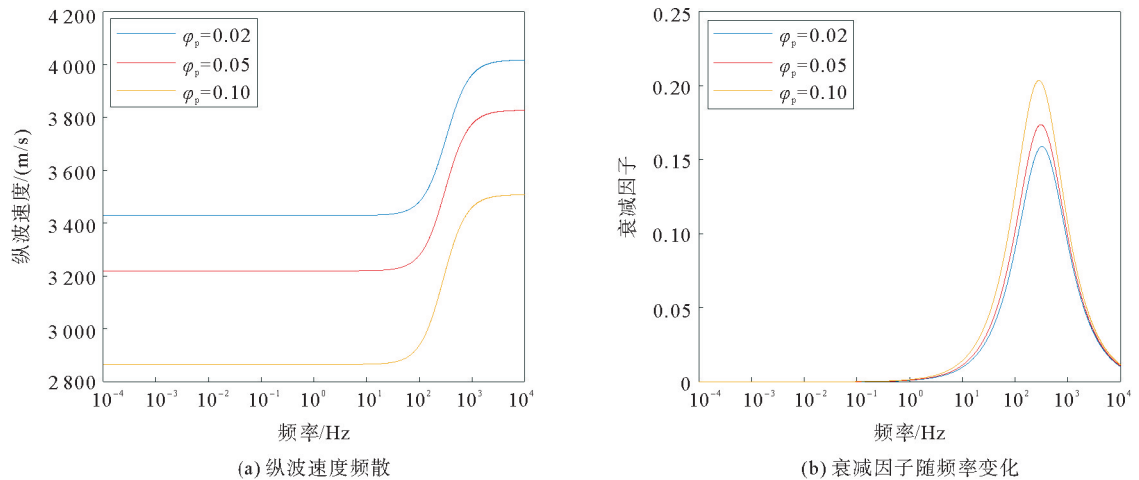


图 2 完全含气时不同孔隙度的纵波速度和衰减因子随频率变化规律

Fig. 2 Variation of P-wave velocity and attenuation factor with frequency at different full gas porosity

2 基于速度频散规律的含气储层 AVO 响应正演模拟

反射率法是建立在层状均匀介质假设条件下表征波传播规律的一种方法。对于分层弹性介质,从频率域内的运动方程和本构关系出发,得到频率-慢度域方程组^[3]:

$$\partial_z \mathbf{b} = i\omega \mathbf{A} \mathbf{b} + \mathbf{F}. \tag{9}$$

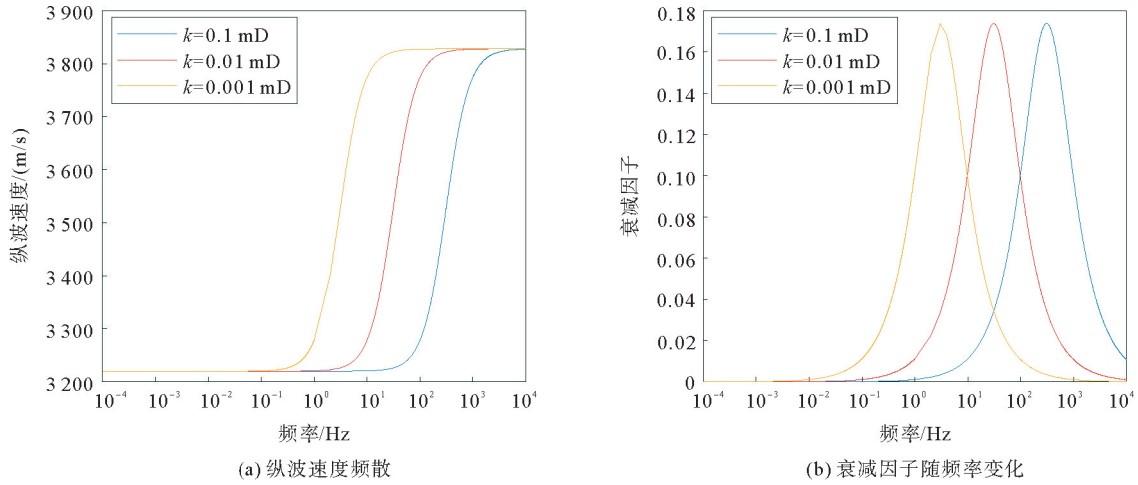


图3 完全含气时不同渗透率的纵波速度和衰减因子随频率变化规律

Fig. 3 Variation of P-wave velocity and attenuation factor with frequency at different full gas permeability

式中: \mathbf{b} 为应力位移矢量; ∂_z 为 z 方向的偏导; i 为虚数单位; \mathbf{F} 为体力项; \mathbf{A} 为系统矩阵, 对于弹性波介质的系统矩阵 \mathbf{A} 为 4×4 。式(9)采用 Kennett 反射矩阵方法进行求解, 结合基于 Chapman 模型的频散速度和衰减, 通过层状递推公式获得反射透射系数矩阵。该矩阵包含波在层状介质传播过程中所有的反射波、透射波、转换波和多次反射等效应^[3]:

$$\mathbf{R}_D^{AC} = \mathbf{R}_D^{AB} + \mathbf{T}_U^{AB} (\mathbf{E}^{BC} \mathbf{R}_D^{BC} \mathbf{E}^{BC}) [\mathbf{I} - \mathbf{R}_U^{AB} (\mathbf{E}^{BC} \mathbf{R}_D^{BC} \mathbf{E}^{BC})]^{-1} \mathbf{T}_D^{AB} \quad (10)$$

式中: 各项 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别代表不同波在不同层产生的反射或透射系数矩阵, 其下标 U 和 D 分别代表上行波和下行波, 上标 A, B, C 分别代表反射透射系数矩阵所在的层。如 \mathbf{R}_D^{AC} 表示下行波在 AC 层产生的反射系数矩阵, \mathbf{R}_D 里的 4 个元素分别代表不同类型的反射系数, 本次仅对 PP 波反射系统 \mathbf{R}_D^{PP} 开展研究, 表达式为

$$\mathbf{R}_D = \begin{bmatrix} R_D^{PP} & R_D^{PS} \\ R_D^{SP} & R_D^{SS} \end{bmatrix} \quad \text{图 4 为单薄层的反射透射示意图, 该图直观展示了各参数的作用。}$$

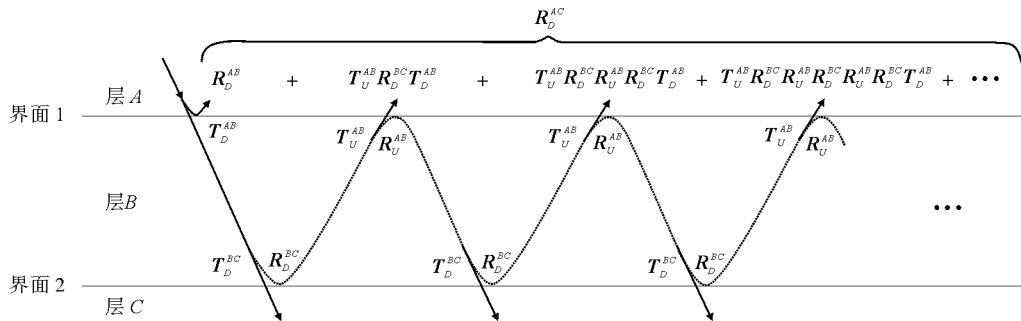


图4 单薄层的反射透射示意图

Fig. 4 Schematic diagram of reflection and transmission of a single thin layer

式(10)中的 \mathbf{E}^{BC} 以及求逆项 $[\mathbf{I} - \mathbf{R}_U^{BC} \mathbf{R}_U^{AB}]^{-1}$ 分别表示相移项和层间多次反射:

$$\mathbf{E}^{BC} = \begin{bmatrix} e^{i\omega q_\alpha h} & \\ & e^{i\omega q_\beta h} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$[\mathbf{I} - \mathbf{R}_U^{BC} \mathbf{R}_U^{AB}]^{-1} = \mathbf{I} + \mathbf{R}_U^{BC} \mathbf{R}_U^{AB} + (\mathbf{R}_U^{BC} \mathbf{R}_U^{AB})^2 + \dots + (\mathbf{R}_U^{BC} \mathbf{R}_U^{AB})^n \quad (12)$$

式中: q 为垂直慢度, α 和 β 分别为纵、横波速度, h 为储层厚度, \mathbf{I} 为单位矩阵, 阶数 n 为层间反射的次数。由此得到频率-慢度域反射系数, 通过斯奈尔定律将其转化为频率-角度域反射系数, 再将反射系数与频率域

地震子波相乘得到反射振幅谱,最后经傅里叶逆变换得到时间-角度域的 AVA 合成地震记录 Φ ,

$$\Phi = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega, \theta) e^{i\omega t} d\omega, \tag{13}$$

$$S = W \cdot R. \tag{14}$$

式中: S 为反射振幅谱, W 为子波频谱, R 为频率域反射系数。由式(10)和式(13)分别得到考虑了层间多次反射、速度频散的频变反射系数和 AVA 合成地震记录。

3 频变反射系数特征响应分析

Guo 等^[12]建立了具有速度频散的砂岩储层被页岩覆盖的两种模型,在此基础上本研究综合考虑含气储层本身固有衰减和层间多次反射的影响,建立四种频变反射系数模型:弹性介质的单界面模型、有速度频散的单界面模型、弹性介质的层状模型和有速度频散的层状模型,模型及弹性参数如图 5 所示。本研究采用 Zeoppritz 方程和反射率法计算单界面和单薄层时储层分别为弹性介质和含速度频散衰减介质时的频变反射系数(图 5)。

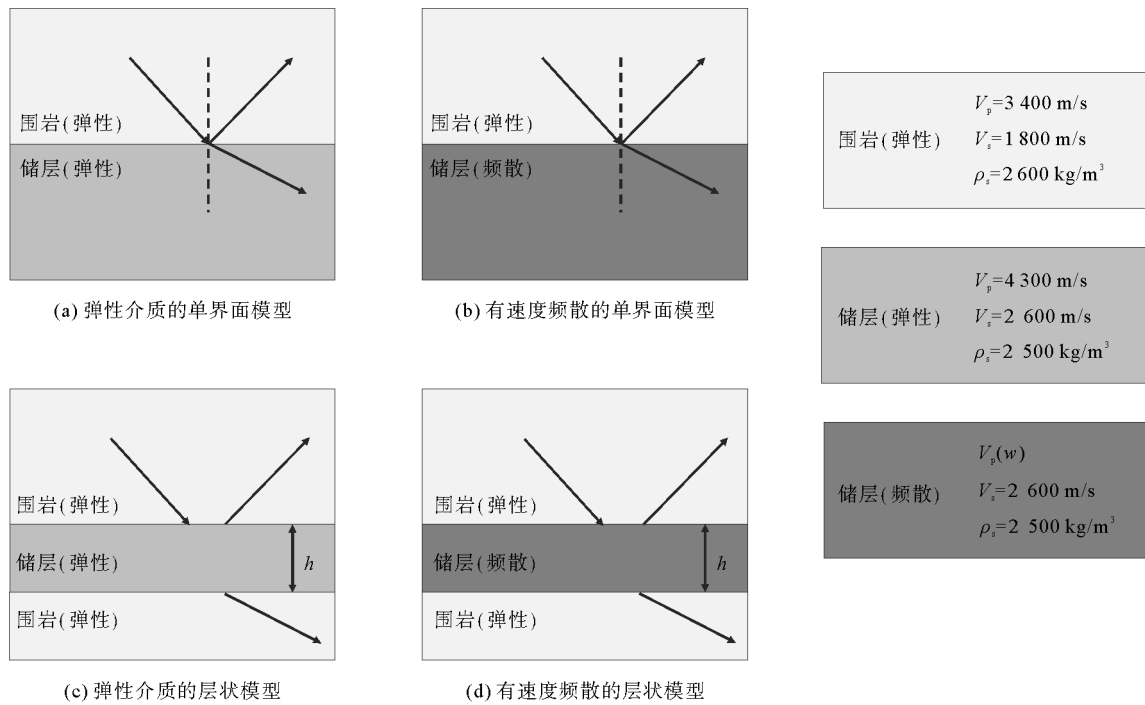


图 5 用于研究反射系数随频率变化的四种模型

Fig. 5 Four models for studying the variation of reflection coefficient with frequency

图 6 为不同介质和厚度时反射系数随频率和入射角的变化规律。对比图 6(a)和图 6(c)可知,弹性介质的单界面反射系数并不随频率发生改变,而弹性介质的层状模型反射系数却聚焦在某一频率区域,即“调谐频率”处。由图 6(b)和图 6(d)可以看出,当储层中含气体时会引起衰减,速度呈频散特征。由图 6 可以看出,单界面的反射系数发生反转,但随频率的变化仍然很小,而层状结构的频变反射系数变化较大。

地震波在层状介质内的多次反射,使常规含气储层的顶界面 AVO 无法准确表征其厚度变化特征。大部分地震勘探资料的主频在 10~100 Hz 范围内,本研究选择 50 和 25 Hz 两个典型调谐频率进行分析,其厚度分别对应于 21.5 和 43 m。图 7 和图 8 分别展示了 21.5 和 43 m 厚度储层在不同含饱和度时反射系数随频率和入射角的变化。对比图 7 和图 8 可以看出,地震波在层厚不同储层内的传播时间延迟导致调谐频率发生变化,随着含饱和度的增加,调谐频率先减小后增大,21.5 和 43 m 储层对应的频变反射系数聚焦区域分别从弹性介质对应的 50 和 25 Hz 向低频移动。

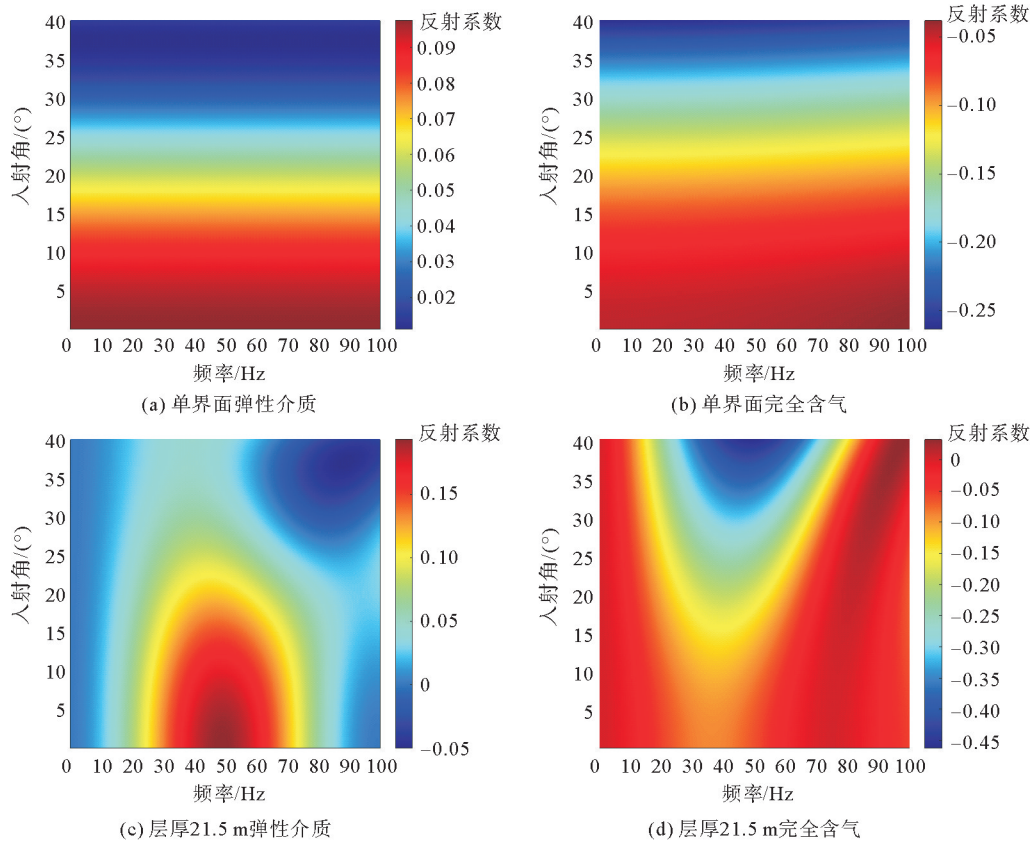


图 6 不同介质和厚度时反射系数随频率和入射角的变化规律

Fig. 6 Variation of reflection coefficient with frequency and incident angle under different media and thickness

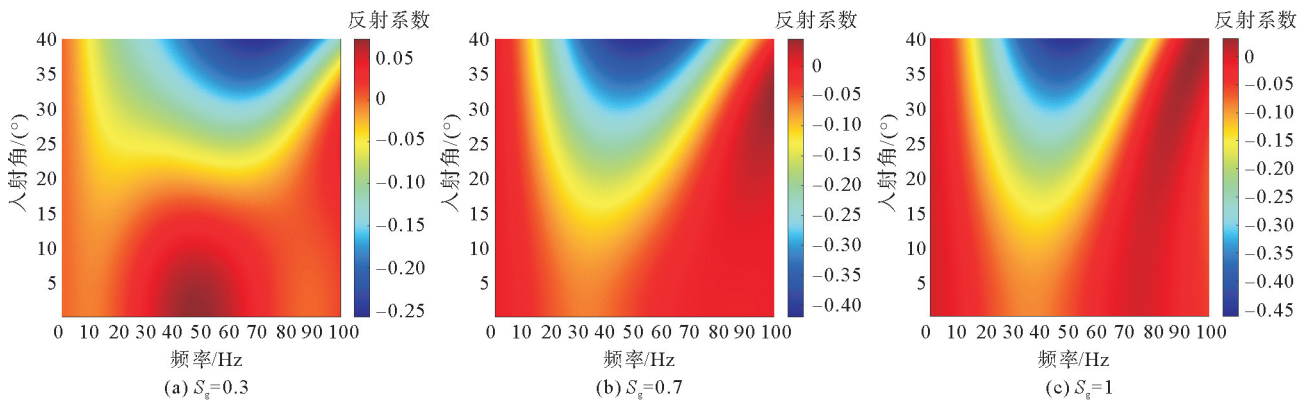


图 7 层厚 21.5 m 储层不同含气饱和度时反射系数随频率和入射角的变化规律

Fig. 7 Variation of reflection coefficient with frequency and incidence angle in 21.5 m reservoir with different gas saturation

图 9 展示了固定频率在 30 Hz 时单界面、层厚 21.5 和 43 m 储层的反射系数随入射角的变化,可以看出其趋势大体一致。反射系数均随含气饱和度的增加而不断减小再趋于稳定。本研究基于 35 Hz 雷克子波和式(14)得到如图 10 所示的合成地震记录。由图 9 和图 10 可以看出,在 $S_g=0.3$ 时,AVO 曲线开始大于 0,随入射角的增大振幅减小且发生极性反转;且随含气饱和度的增大,AVO 曲线均小于 0,振幅绝对值随入射角的增大而增大,发生 II 类 AVO 到 III 类 AVO 的转变。

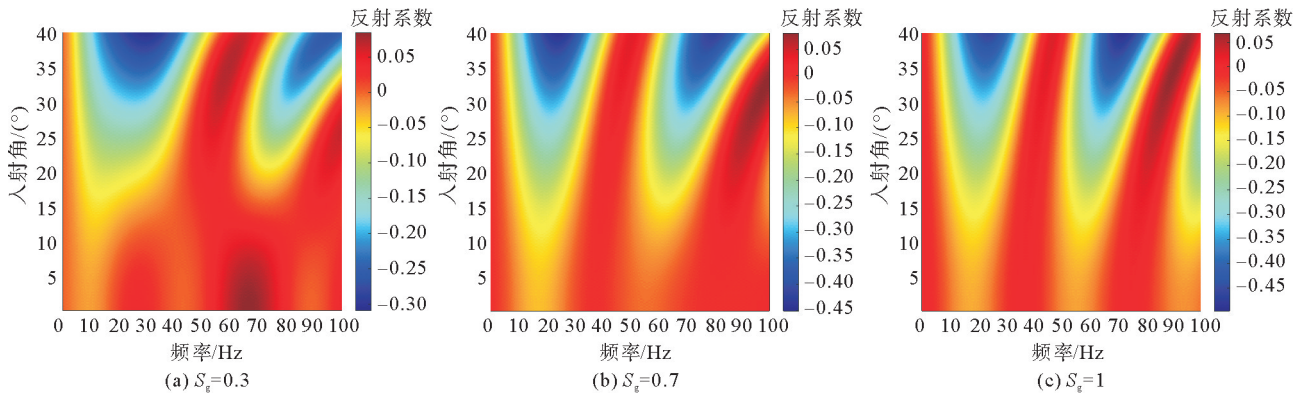


图 8 层厚 43 m 储层不同含气饱和度时反射系数随频率和入射角的变化规律

Fig. 8 Variation of reflection coefficient with frequency and incidence angle in 43 m reservoir with different gas saturation

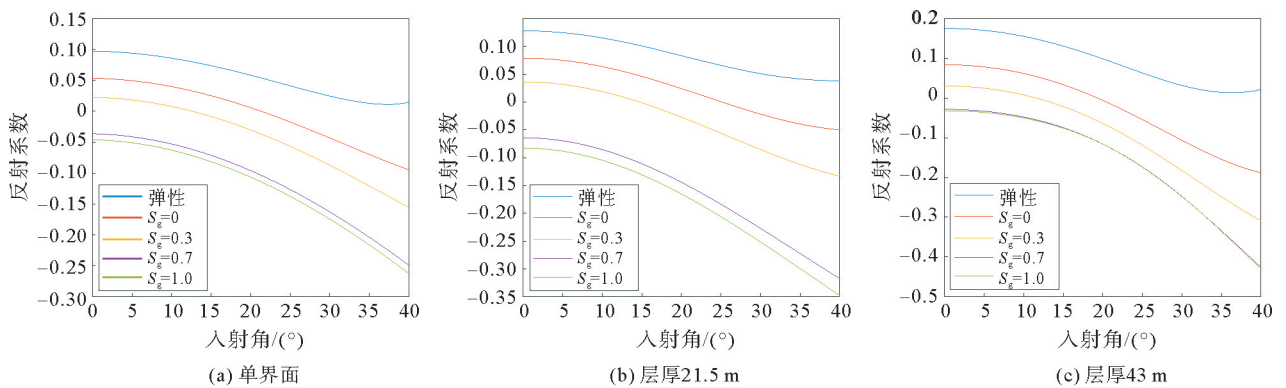


图 9 不同厚度和含气饱和度 30 Hz 时反射系数随入射角的变化

Fig. 9 Variation of reflection coefficient with incident angle in 30 Hz with different thickness and gas saturation

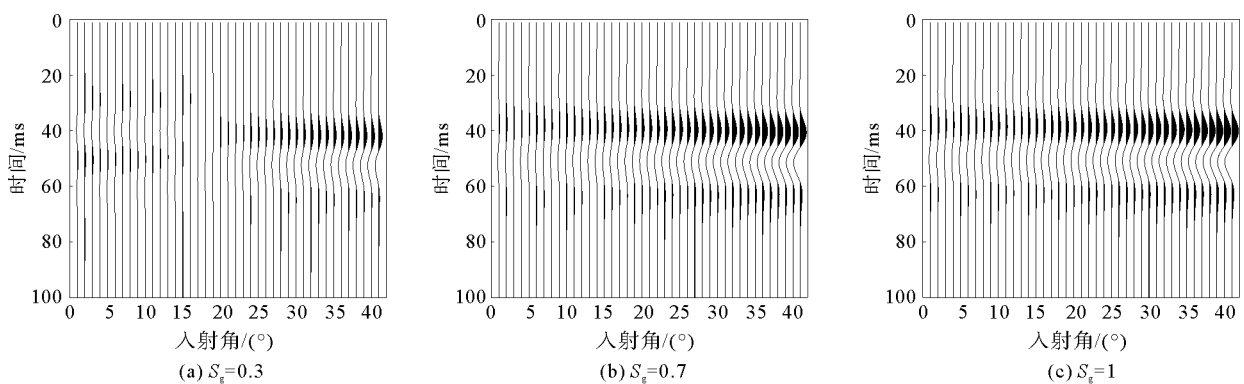


图 10 层厚 21.5 m 储层在不同含气饱和度时的 AVA 合成地震记录

Fig. 10 AVA synthetic seismic records of 21.5 m reservoir with different gas saturation

除含气储层中不同含气饱和度导致反射系数发生改变外,储层自身性质也会一定程度地影响反射系数。本研究分析了不同孔隙度和渗透率对完全含气时储层频变反射系数的影响。图 11 和图 12 分别为层厚 21.5 m 完全含气储层在不同孔隙度和渗透率时反射系数随频率和入射角的变化,结合图 2、图 3 可以发现,孔隙度和渗透率对反射系数及其聚焦区域均有一定影响:孔隙度影响频散速度和衰减的幅度,使反射系数随孔隙度的增大而减小(图 11);渗透率影响速度频散和衰减峰值对应的特征频率,反射系数随渗透率的增大而减小(图 12)。

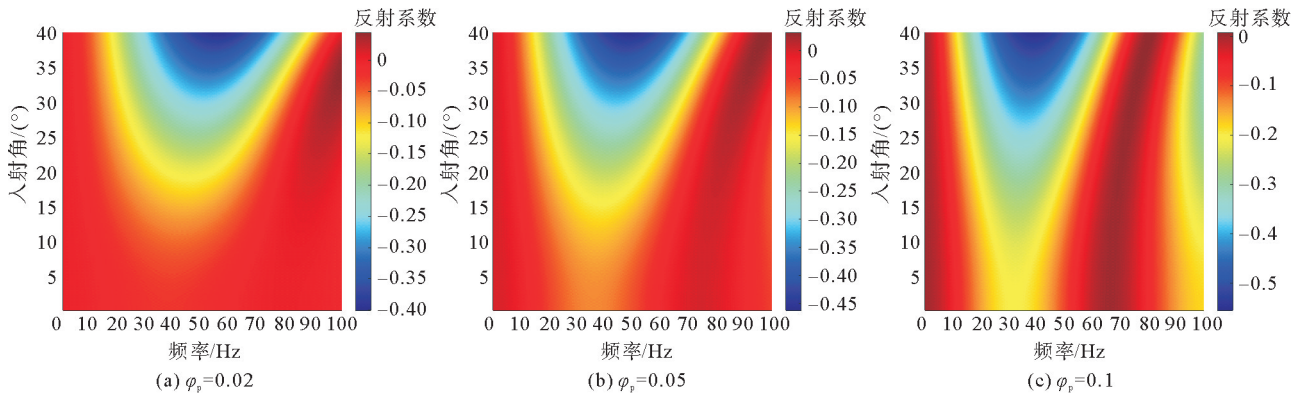


图 11 层厚 21.5 m 完全含气储层在不同孔隙度时反射系数随频率和入射角的变化规律

Fig. 11 Variation of reflection coefficient of 21.5 m gas reservoir with frequency and incident angle at different porosity

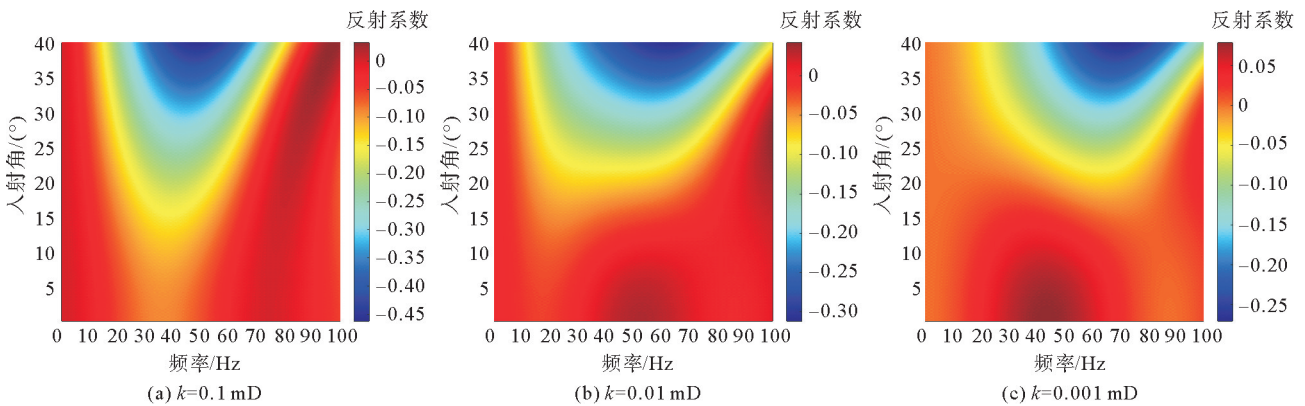


图 12 层厚 21.5 m 完全含气储层在不同渗透率时反射系数随频率和入射角的变化规律

Fig. 12 Variation of reflection coefficient of 21.5 m gas reservoir with frequency and incident angle at different permeability

当固定某一角度时,弹性介质单薄层的反射系数随频率呈正弦变化,而对于含速度频散或多层时,频率相关的反射系数响应更为复杂。由此建立如图 13 所示的三种模型:①单储层模型(图 13(a)),储层厚度 h 分别为 21.5、30、43 m;②21.5 m 储层模型(图 13(b)),储层砂岩的比例分别为 100%、70%、50%和 30%,其余由围岩填充;③10 层储层模型(图 13(c)),每层储层厚度为 2.15 m,其间由 2.15 m 厚的围岩隔开。储层与围岩的弹性参数如图 5 所示。

图 14 和图 15 为入射角 5° 时反射系数随图 13 模型变化的敏感性。由图 14(a)可以看出,当储层层厚从 21.5 m 增至 43 m 时,调谐频率从 50 Hz 减至 25 Hz,层厚 30 m 储层的调谐频率为 36 Hz,但在调谐频率处的振幅均相同。而图 14(b)中储层砂岩占比从 100%减为 30%,其余被围岩所填充,此时储层的弹性参数 $[V_p, V_s, \rho]$ 也随之发生改变。由于储层的厚度不变,因此调谐频率随着纵波速度的减小而减小,而调谐振幅随着砂岩比例的减小而大幅减小。图 14(c)把层厚 21.5 m 储层分成 10 层,调谐频率和调谐振幅均比单层减小一半多,原因是 43 m 厚度地层的储层有效厚度为 21.5 m,地震波传播时的时间延迟与层厚 21.5 m 储层相比发生了改变。

对不同储层加入速度频散和衰减,其含气饱和度从 0.1 逐渐升为 1.0。由图 15 可以看出,当储层中存

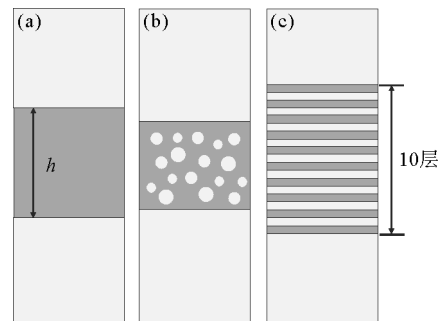


图 13 不同储层随频率变化的反射系数的三种模型

Fig. 13 Three models of reflection coefficients varying with frequency of different reservoirs

在速度频散和衰减时,调谐频率和调谐振幅均发生改变,从反射系数随频率的变化可以看出,调谐频率随着含气饱和度的增加先减小后增加。对比图 15(a)和图 15(b)可以发现,在不同含气饱和度时层厚 21.5 m 储层的调谐频率均为层厚 43 m 储层调谐频率的 2 倍。对比图 15(b)和图 15(c)可以看出,层厚 43 m 储层的调谐振幅与薄互层的调谐振幅也呈倍数关系,且调谐模式基本一致。

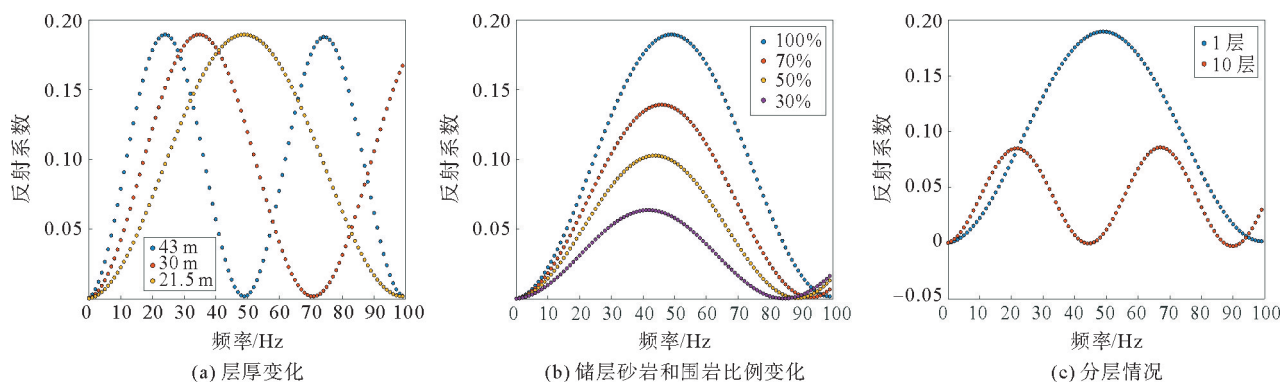


图 14 入射角为 5°时反射系数的敏感性

Fig. 14 Sensitivity of the reflection coefficient with the incident angle of 5°

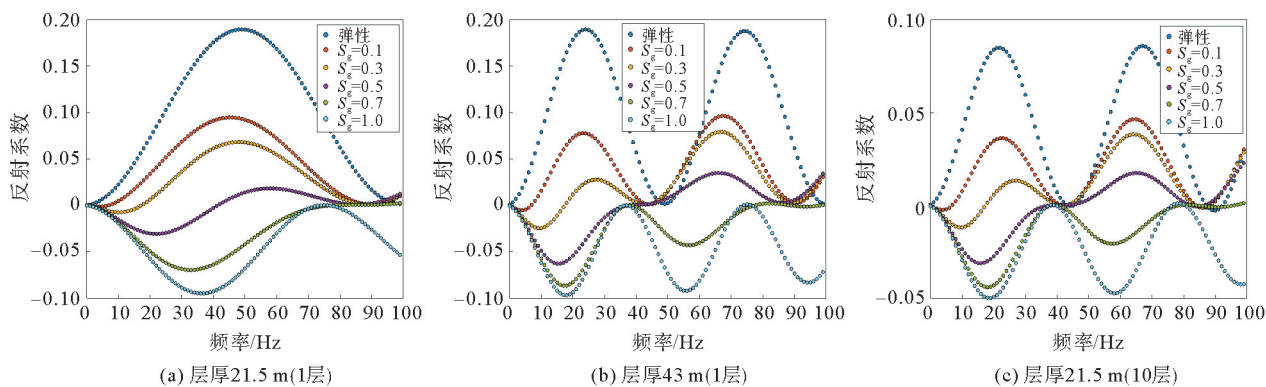


图 15 入射角为 5°时反射系数的敏感性

Fig. 15 Sensitivity of the reflection coefficient with the incident angle of 5°

4 结论

1) 弹性介质条件下的单界面反射系数不随频率发生变化,但层状介质的反射系数在“调谐频率”处会产生聚焦效应,导致在调谐频率处层状介质的反射系数大于单界面的反射系数,且该聚焦效应会随含气储层的厚度及自身固有衰减产生规律性变化。

2) 储层的孔隙度、渗透率和含气饱和度导致纵波速度和衰减因子随频率发生改变,致使反射系数随入射角和频率变化而改变,且在一定条件下储层含气还会导致 AVO 类型的改变,为利用频变特征开展储层的含气性检测提供了依据。

3) 当考虑不同储层模型对频变反射系数的影响时,发现弹性介质下储层的频率调谐模式主要受储层厚度影响,而调谐振幅则主要受储层中砂岩比例的影响。当储层含气时,指示层厚的调谐频率也会随含气饱和度的变化而改变,甚至反射系数随频率的变化会出现反转。

参考文献:

[1] AKI K, RICHARDS P G. Quantitative seismology[M]. Mill Valley, California: University Science Books, 2002.

- [2] SHUEY R T. A simplification of the Zoeppritz equations[J]. *Geophysics*, 1985, 50(4): 609-614.
- [3] KENNETT B L N, KERRY N J. Seismic waves in a stratified half space[J]. *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, 1979, 57(3): 557-583.
- [4] LIU Y, SCHMITT D R. Amplitude and AVO responses of a single thin bed[J]. *Geophysics*, 2003, 68(4): 1161-1168.
- [5] 张恩珂, 柏冠军, 郑中刚. 地震资料频率域预测煤层厚度方法研究及应用[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 24(4): 59-62.
ZHANG Enke, BAI Guanjun, ZHENG Zhonggang. Study on prediction method of coal seam thickness using seismic data frequency domain and its application[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2005, 24(4): 59-62.
- [6] PAN W Y, INNANEN K A. AVO/AVF analysis of thin-beds in elastic media[C]//SEG Houston 2013 Annual Meeting. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2013: 373-377.
- [7] YANG C, WANG Y, WANG Y H. Reflection and transmission coefficients of a thin bed[J]. *Geophysics*, 2016, 81(5): N31-N39.
- [8] FOSTER D J, LANE F D, ZHAO Z Y. A systematic approach for quantifying wave propagation in vertically inhomogeneous media[J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 210: 706-730.
- [9] KUMAR D, ZHAO Z Y, FOSTER D J, et al. Frequency-dependent AVO analysis using the scattering response of a layered reservoir[J]. *Geophysics*, 2020, 85(2): N1-N16.
- [10] CHAPMAN M, MAULTZSCH S, LIU E R, et al. The effect of fluid saturation in an anisotropic multi-scale equant porosity model[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2003, 54: 191-202.
- [11] 秦喜林. 基于地震频变属性的流体检测方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
QIN Xilin. Research on fluid detection method based on seismic frequency-dependent attributes[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [12] GUO Z Q, LIU C, LI X Y, et al. An improved method for the modeling of frequency-dependent amplitude-versus-offset variations[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 12(1): 63-67.
- [13] 逢硕. 页岩气储层频散特征的岩石物理描述与频变 AVO 反演研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
PANG Shuo. Rock-physics modeling of dispersion characteristics and frequency-dependent AVO inversion in shale gas reservoirs[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [14] JIN H, LIU C, GUO Z Q, et al. Rock physical modeling and seismic dispersion attribute inversion for the characterization of a tight gas sandstone reservoir[J/OL]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9. DOI:10.3389/feart.2021.641651.
- [15] HE Y X, LI X L, TANG G Y, et al. Modeling the effects of fracture infill on frequency-dependent anisotropy and AVO response of a fractured porous layer[J/OL]. *Petroleum Science*, 2021. DOI:10.1007/s12182-021-00555-0.

(责任编辑:高丽华)