

张广智,陈怀震,王琪等. 基于碳酸盐岩裂缝岩石物理模型的横波速度和各向异性参数预测. 地球物理学报, 2013, 56(5):1707-1715, doi:10. 6038/cjg20130528.

Zhang G Z, Chen H Z, Wang Q, et al. Estimation of S-wave velocity and anisotropic parameters using fractured carbonate rock physics model. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(5):1707-1715, doi:10. 6038/cjg20130528.

基于碳酸盐岩裂缝岩石物理模型的 横波速度和各向异性参数预测

张广智,陈怀震,王琪,印兴耀

中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,青岛 266555

摘 要 高角度缝隙充填的碳酸盐岩储层可以等效为具有水平对称轴的横向各向同性介质. 本文提出了适用于裂缝型碳酸盐岩的岩石物理模型构建流程,重点介绍了在碳酸盐岩各向同性背景中,综合利用微小裂隙模型和线性滑动模型添加缝隙系统,并分析了当缝隙充填不同流体时,各向异性参数随纵横波速比的变化特征. 同时本文讨论了裂缝密度和缝隙充填流体对地震反射系数的影响,推导了不同类型流体充填时储层反射系数与裂缝密度的近似关系式,阐述了各向异性流体替换理论,最终实现饱和流体碳酸盐岩裂缝储层的纵横波速度和各向异性参数的估测. 选取某碳酸盐岩工区 A 井对该方法进行试算,结果表明基于碳酸盐岩裂缝岩石物理模型估算的纵横波速度值与测井值吻合较好,而且估测所得的各向异性参数值也能够较好地反映出裂缝储层位置.

关键词 碳酸盐岩,裂缝,岩石物理,各向异性,裂缝密度

doi:10. 6038/cjg20130528

中图分类号 P631

收稿日期 2012-05-18, 2013-04-24 收修定稿

Estimation of S-wave velocity and anisotropic parameters using fractured carbonate rock physics model

ZHANG Guang-Zhi, CHEN Huai-Zhen, WANG Qi, YIN Xing-Yao

School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China

Abstract Carbonate rocks with high angle fractures can be equivalent to HTI media (Horizontal Transverse Isotropic). This paper put forward the flowchart to integrate rock physics model in layered fractured carbonate rocks. It focused on the study of jointing cracks and fractures into the isotropic background media by Hudson's model and Schoenberg's model, and made an analysis of anisotropic parameters variation with P wave to S wave velocity ratio when fracture filled with different fluids. The next step was to show the influence which was induced by fractures density and fracture fluid on seismic reflectivity coefficient. And it also aimed to accomplish fluid filling work in fractures space using Brown and Korringa's generalized Gassmann equations. Then we calculated P wave, S wave velocity and anisotropic parameters in carbonate rocks which jointed fractures and saturated fluid. At last, the paper discussed the accuracy of the parameters estimation method based on fractured carbonate rock physics model. The estimated S-wave velocity was consistent with the log value. And the estimated anisotropic parameters could

基金项目 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2013CB228604)、国家油气重大专项(2011ZX05014-001-010HZ)和中国石油科技创新基金项目(2011D-5006-0301)资助.

作者简介 张广智,男,1971年生,教授,主要从事地震岩石物理、储层预测和流体识别方面的研究. E-mail: zhanggz@upc.edu.cn

describe the fractured reservoir location.

Keywords Carbonate rocks, Fracture, Rock physics, Anisotropy, Fracture density

1 引言

岩石物理模型在地震反演和解释中有着十分重要的作用,是连接地震属性(纵、横波速度等)以及储层参数(孔隙度、饱和度、泥质含量等)的重要纽带^[1-4]. 正确适用的岩石物理模型不仅能够为正反演提供基础和必要的资料,同时可以降低地震解释的风险.

各向异性是沉积岩石中普遍存在的现象^[5]. 通常把具有水平对称轴,垂直或近似垂直平行排列的碳酸盐岩裂缝储层等效成 HTI (Horizontal Transverse Isotropic) 介质^[6-8]. 目前,大量研究表明,地震各向异性是影响地震反射振幅随偏移距变化(AVO)的一个因素,而且裂缝型碳酸盐岩储层的地震反射振幅还会表现出随测线方位角变化(AVOA)的特征. Ruger^[9]详细论述了各向异性介质(VTI 和 HTI)的地震波传播特征的变化,并且依照 Thomsen^[10]弱各向异性近似理论提出各向异性介质反射系数近似式,为基于各向异性理论的地震反演提供了理论基础.

随着各向异性理论研究的深入,以及砂泥岩岩石物理模型在碳酸盐岩储层中的不适用性,基于各向异性理论的岩石物理模型的研究越来越被关注^[11-17]. 本文给出碳酸盐岩裂缝储层岩石物理模型的建立步骤,重点研究了依照 Hudson^[18-19]模型和 Schoenberg^[20]线性滑动模型在各向同性介质背景中添加裂缝系统,并且利用 Brown 和 Korrigna^[21]公式完成各向异性岩石的流体替换,计算饱和流体裂缝储层的弹性参数和各向异性参数. 同时基于 Ruger 各向异性反射系数近似式,分析裂缝密度 e 和缝隙饱和不同流体(饱和油水或饱和气)对反射系数的影响,推导出不同流体充填情况下地震反射系数与裂缝密度 e 的关系式.

2 方法原理

碳酸盐岩基质主要由方解石和白云石组成,其次考虑含泥质和砂质时的影响;孔隙主要由粒间孔隙(含溶孔)、溶洞和裂缝三部分组成,本文主要讨论裂缝的作用;孔隙流体由油、气和水组成(图 1).

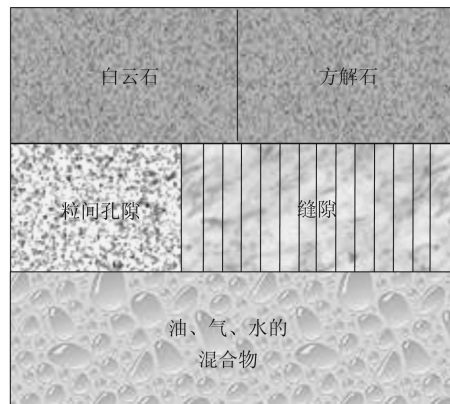


图 1 裂缝型碳酸盐岩岩石物理模型示意图

Fig. 1 Fractured carbonate rock physics model

本文提出裂缝型碳酸盐岩岩石物理模型的构建流程如下:

- (1) 利用 Voigt-Reuss-Hill 平均计算混合矿物的弹性模量;
- (2) 利用 DEM 模型将孔隙加进系统,并计算干燥岩石骨架的体积模量和剪切模量;
- (3) 利用 Hudson 理论和 Schoenberg & Sayers 理论,在碳酸盐岩介质各向同性背景中加入裂缝系统,修正计算出的模量;
- (4) 利用 Wood 公式将孔隙流体进行混合,计算出混合流体的体积模量;
- (5) 利用 Brown 和 Korrigna 公式完成缝隙流体替换;
- (6) 计算裂缝型碳酸盐岩的弹性参数和各向异性参数.

裂缝型碳酸盐岩岩石物理模型构建的基本思想是:在各向同性背景介质的基础上添加裂缝的影响,计算干岩石刚度系数矩阵,依照各向异性流体替换方法估算得到饱和流体岩石的弹性参数和各向异性参数. 裂缝型碳酸盐岩岩石物理模型建立的部分步骤解析如下.

2.1 VRH 矿物平均

利用 Voigt-Reuss-Hill 平均计算混合矿物的弹性模量:

$$K_m = \frac{K_V + K_R}{2},$$

$$U_m = \frac{U_V + U_R}{2}.$$
(1)

其中, $K_V = \sum_{i=1}^N f_i K_i$, $\frac{1}{K_R} = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{K_i}$, $U_V = \sum_{i=1}^N f_i U_i$, $\frac{1}{U_R} = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{U_i}$. 式中 f_i , K_i 和 U_i 分别为第 i 个组成成分的体积分数, 体积模量和剪切模量, 这里组成成分分别为方解石和白云石, K_m 和 U_m 分别为混合矿物的体积模量和剪切模量.

2.2 裂缝模型

目前有两种应用广泛的裂缝模型, Hudson 模型和 Schoenberg 线性滑动模型.

Hudson 理论是建立在整体平均的基础上^[22]. 该模型假设弹性介质的内部分布着薄硬币形状的椭圆缝隙(图 2).

Hudson 模型利用裂缝密度和缝隙纵横比来描述裂缝系统的结构. 裂缝密度 e 的定义如下:

$$e = \frac{3\phi}{4\pi\alpha}, \quad (2)$$

其中, ϕ 代表孔隙度, α 是裂隙纵横比. 则 Hudson 模型的弹性矩阵 $\mathbf{C}_{ij}^{\text{eff}}$ 表示为:

$$\mathbf{C}_{ij}^{\text{eff}} = \mathbf{C}_{ij}^0 + \mathbf{C}_{ij}^1 + \mathbf{C}_{ij}^2. \quad (3)$$

式中, \mathbf{C}_{ij}^0 为各向同性背景弹性矩阵, \mathbf{C}_{ij}^1 和 \mathbf{C}_{ij}^2 分别为引入裂隙的各向异性一阶校正和二阶校正. 含一组简单的平行裂隙的介质, Hudson 模型一阶校正

$$\mathbf{C}^1 = -\frac{e}{\mu} \begin{bmatrix} (\lambda + 2\mu)^2 U_{33} & \lambda(\lambda + 2\mu)U_{33} & \lambda(\lambda + 2\mu)U_{33} & 0 & 0 & 0 \\ \lambda(\lambda + 2\mu)U_{33} & \lambda^2 U_{33} & \lambda^2 U_{33} & 0 & 0 & 0 \\ \lambda(\lambda + 2\mu)U_{33} & \lambda^2 U_{33} & \lambda^2 U_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu^2 U_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu^2 U_{11} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

U_{11} 和 U_{33} 依赖于缝隙本身充填物的性质:

$$U_{11} = \frac{16(\lambda + 2\mu)}{3(3\lambda + 4\mu)} \frac{1}{1 + M}, \quad (6)$$

$$U_{33} = \frac{4(\lambda + 2\mu)}{3(\lambda + \mu)} \frac{1}{1 + k}. \quad (7)$$

其中,

$$M = \frac{4\mu'(\lambda + 2\mu)}{\pi\alpha\mu(\lambda + \mu)}, \quad (8)$$

$$k = \frac{[K' + (4/3)\mu'](\lambda + 2\mu)}{\pi\alpha\mu(\lambda + \mu)}. \quad (9)$$

K' 和 μ' 是缝隙中充填介质的体积模量和剪切模量, λ 和 μ 是不含裂隙岩石的 Lamé 参数.

(1) 当缝隙为湿裂缝(饱含油水), 且缝隙纵横比 $\alpha \ll 0.1$ 时, $[K' + (4/3)\mu']/(\mu\alpha) \gg 1$:



图 2 Hudson 微小裂隙模型

Fig. 2 Hudson's penny-shaped crack model

后的弹性矩阵:

$$\mathbf{C}^0 = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$U_{11} = \frac{16(\lambda + 2\mu)}{3(3\lambda + 4\mu)}, \quad (10)$$

$$U_{33} = 0. \quad (11)$$

(2) 当缝隙为干裂缝(饱含气)时, $K' = \mu' = 0$:

$$U_{11} = \frac{16(\lambda + 2\mu)}{3(3\lambda + 4\mu)}, \quad (12)$$

$$U_{33} = \frac{4(\lambda + 2\mu)}{3(\lambda + \mu)}. \quad (13)$$

Schoenberg 线性滑动模型是基于 Backus^[23] 平均提出的(图 3).

对于一组可以旋转对称的裂缝系统, Schoenberg 模型的弹性矩阵由各向同性参数 λ 和 μ , 以及垂直于裂缝面和平行于裂缝面的弹性差值 Δ_N 和 Δ_T 进行描述^[24], 表示裂缝对骨架岩石各向同性特征的影响. Schoenberg 线性滑动模型的弹性矩阵为:

$$C = \begin{bmatrix} (\lambda + 2\mu)(1 - \Delta_N) & \lambda(1 - \Delta_N) & \lambda(1 - \Delta_N) & 0 & 0 & 0 \\ \lambda(1 - \Delta_N) & (\lambda + 2\mu)(1 - \chi^2\Delta_N) & \lambda(1 - \chi^2\Delta_N) & 0 & 0 & 0 \\ \lambda(1 - \Delta_N) & \lambda(1 - \chi^2\Delta_N) & (\lambda + 2\mu)(1 - \chi^2\Delta_N) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu(1 - \Delta_T) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu(1 - \Delta_T) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

其中,

$$\chi = \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu}. \quad (15)$$

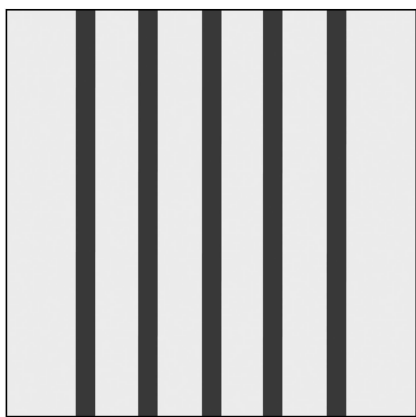


图3 Schoenberg 线性滑动模型

Fig. 3 Schoenberg's linear-slip model

Schoenberg^[25-26]研究了 Hudson 模型和 Schoenberg 线性滑动模型的关系.

$$\Delta_N = \frac{\lambda + 2\mu U_{33} e}{\mu}, \quad (16)$$

$$\Delta_T = U_{11} e, \quad (17)$$

Δ_N 和 Δ_T 分别是线性滑动理论中的正差值和切差值, 而 U_{11} , U_{33} 和 e 是 Hudson 模型应用的参数.

依照 Hudson 模型中关于 U_{11} , U_{33} 的定义, 将其代入式(16)和(17).

$$\Delta_N = \frac{4e}{3g(1-g) \left[1 + \frac{1}{\pi(1-g)} \left(\frac{K' + \frac{4}{3\mu}}{\mu\alpha} \right) \right]}, \quad (18)$$

$$\Delta_T = \frac{16e}{3(3-2g) \left[1 + \frac{4}{\pi(3-2g)} \left(\frac{\mu'}{\mu\alpha} \right) \right]}. \quad (19)$$

其中,

$$g \equiv \frac{\mu}{\lambda + 2\mu} = \frac{V_S^2}{V_P^2}, \quad (20)$$

V_P 和 V_S 分别代表不含裂缝介质(各向同性背景岩石)的 P 波速度和 S 波速度, 结合缝隙饱和不同流

体时 U_{11} 和 U_{33} 的变化, 计算干裂缝和湿裂缝情况下的正差值和切差值.

(1) 当缝隙为湿裂缝(饱含油水)时:

$$\Delta_N = 0, \quad (21)$$

$$\Delta_T = \frac{16e}{3(3-2g)}. \quad (22)$$

(2) 当缝隙为干裂缝(饱含气)时:

$$\Delta_N = \frac{4e}{3g(1-g)}, \quad (23)$$

$$\Delta_T = \frac{16e}{3(3-2g)}. \quad (24)$$

图 4 说明的是利用式(23)和式(24)求得的干裂缝储层的正差值和切差值随纵横波速度变化的特征. 选定裂缝密度 e 不变, 正差值 Δ_N 随纵横波速度比的增大先降低后升高, 而切差值 Δ_T 随纵横波速度比的增大而减小. 因此可以将后续地震数据反演所得的正差值和切差值与图中曲线趋势对比, 进而预测裂缝密度.

Schoenberg 和 Sayers^[27]将 K_N/K_T 定义为缝隙流体的指示因子:

$$\frac{K_N}{K_T} = g \frac{\Delta_N(1 - \Delta_T)}{\Delta_T(1 - \Delta_N)}, \quad (25)$$

讨论饱含气时, K_N/K_T 与裂缝密度 e 和纵横波速比之间的关系(图 5).

$$\frac{K_N}{K_T} \approx \frac{3-2g}{4(1-g)} = 1 - \frac{\sigma}{2}, \quad (26)$$

其中, σ 为泊松比. 式(26)表示干裂缝情况下流体指示因子的大小, 因此通过计算裂缝储层 K_N/K_T 的值与图 5 进行对照, 即可判断裂缝储层的密度以及缝隙充填物的性质.

由图 5 可知: 随裂缝密度的增大, 流体指示因子随纵横波速比变化越明显. 当裂缝密度小于 0.03 时, K_N/K_T 值接近 1, 当裂缝密度大于 0.03 时, K_N/K_T 值大于 1, 说明干裂缝在垂直裂缝面的压缩比平行裂缝面的剪切滑动更容易.

根据 Thomsen 参数的求取方法, 结合线性滑动模型, 推导饱含油水时 Thomsen 参数^[28]:

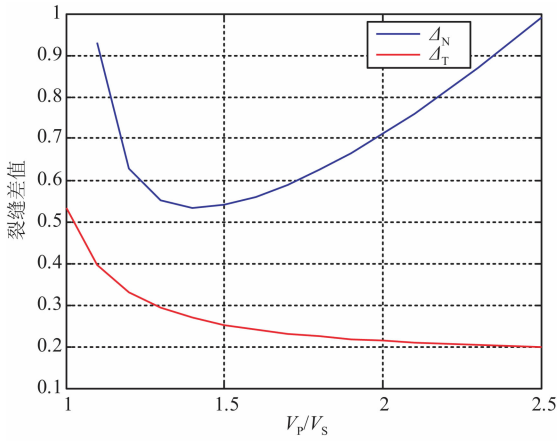


图4 Δ_N 和 Δ_T 随 V_P/V_S 的变化关系

Fig. 4 Δ_N and Δ_T variation with V_P/V_S

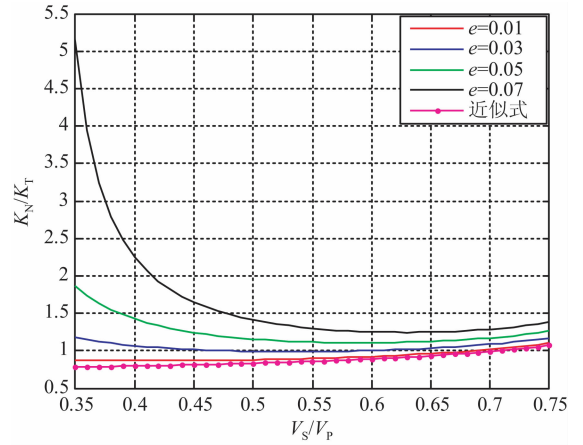


图5 K_N/K_T 随裂缝密度 e 和 V_S/V_P 的变化关系

Fig. 5 K_N/K_T variation with fractures density e and V_S/V_P

$$\begin{aligned} \epsilon^{(v)} &= 0, \\ \delta^{(v)} &= -\frac{32ge}{3(3-2g)}, \\ \gamma &= \frac{8e}{3(3-2g)}. \end{aligned} \quad (27)$$

同时讨论缝隙饱含气时 Thomsen 参数与裂缝密度之间的关系(图 6):

$$\begin{aligned} \epsilon^{(v)} &= -\frac{8}{3}e, \\ \delta^{(v)} &= -\frac{8}{3}e \left[1 + \frac{g(1-2g)}{(3-2g)(1-g)} \right], \\ \gamma &= \frac{8e}{3(3-2g)}. \end{aligned} \quad (28)$$

从图 6 中可以看出,缝隙中饱含气时,三个各向异性参数的绝对值都随着裂缝密度的增加而增大。

综上,结合式(27)和式(28),讨论干裂缝(饱含气)和湿裂缝(饱含油水)时,Thomsen 参数 $\epsilon^{(v)}$, $\delta^{(v)}$ 和 γ 与横纵波速比的关系(图 7)。

图 7 表明,缝隙中所含流体的不同会引起 $\epsilon^{(v)}$ 和 $\delta^{(v)}$ 随横纵波速比的变化特征发生改变,而 γ 并不受缝隙中流体的影响。当缝隙含油水时 $\epsilon^{(v)}$ 数值为 0, 含气时 $\epsilon^{(v)}$ 会变为负值;当缝隙中含油水时

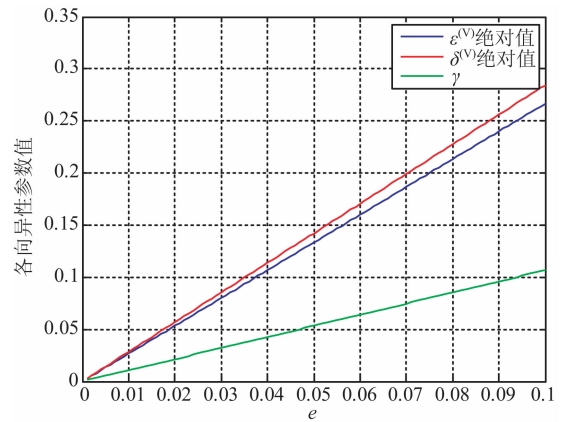


图6 干裂缝 Thomsen 参数随缝隙密度 e 变化

Fig. 6 Thomsen parameters variation with crack density (dry fracture)

$\delta^{(v)}$ 数值随横纵波速比变化剧烈,而缝隙含气时 $\delta^{(v)}$ 随横纵波速比变化不明显。因此可根据该特征来识别裂缝储层流体的特性。

2.3 裂缝模型流体替换

为进一步完善介质流体替换理论,Gassmann^[29]提出各向异性孔隙岩石的流体替换公式,其线性弹性系数矩阵表示如下:

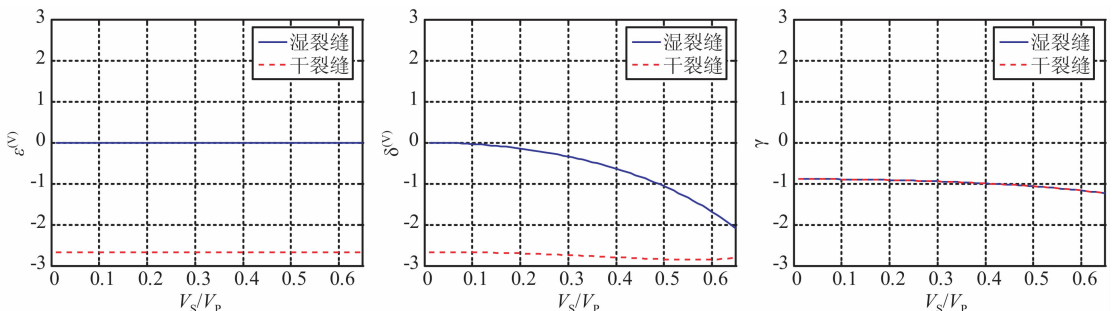


图7 干裂缝和湿裂缝 Thomsen 参数随 V_S/V_P 变化

Fig. 7 Dry fracture and wet fracture's Thomsen parameters variation with V_S/V_P

$$c_{ijkl}^{\text{sat}} = c_{ijkl}^{\text{dry}} + \frac{(K_0 \delta_{ij} - c_{ijaa}^{\text{dry}}/3)(K_0 \delta_{kl} - c_{bbkl}^{\text{dry}}/3)}{(K_0/K_{\text{fl}})\phi(K_0 - K_{\text{fl}}) + (K_0 - c_{cddd}^{\text{dry}}/9)} \quad (29)$$

其中, c_{ijkl}^{dry} 是干岩石的有效弹性刚度系数, c_{ijkl}^{sat} 是饱和流体岩石的有效弹性刚度系数, K_0 是矿物的体积模量, K_{fl} 是流体的体积模量, c_{ijaa}^{dry} 代表刚度矩阵中下标后两项相同的干岩石的有效弹性刚度系数, c_{bbkl}^{dry} 代表刚度矩阵中下标前两项相同的干岩石的有效弹性刚度系数, c_{cddd}^{dry} 指刚度矩阵中对角线上的干岩石的有效弹性刚度系数,

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{for } i = j \\ 0 & \text{for } i \neq j \end{cases} \quad (30)$$

Gassmann 方程假设矿物是均质和各向同性的, 尽管干岩石和饱和岩石具有任意各向异性特征. Brown 和 Korringa 对各向异性岩石的流体替换进行了研究, 虽然计算结果与 Gassmann 方程相似, 但

$$\begin{aligned} R_{\text{pp}}(\theta, \Phi) \approx & \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta V_{\text{p}}}{\bar{V}_{\text{p}}} + \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} \right] + \left[\frac{\Delta V_{\text{p}}}{2\bar{V}_{\text{p}}} - 4 \frac{\bar{V}_{\text{s}}^2}{\bar{V}_{\text{p}}^2} \frac{\Delta V_{\text{s}}}{\bar{V}_{\text{s}}} - 2 \frac{\bar{V}_{\text{s}}^2}{\bar{V}_{\text{p}}^2} \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} \right] \sin^2 \theta \\ & + \frac{1}{2} \frac{\Delta V_{\text{p}}}{\bar{V}_{\text{p}}} \sin^2 \theta \tan^2 \theta + (\cos^2 \Phi \sin^2 \theta + \sin^2 \Phi \cos^2 \Phi \sin^2 \theta \tan^2 \theta) \left(\frac{1}{2} \Delta \delta^{(\text{v})} \right) \\ & + (\cos^4 \Phi \sin^2 \theta \tan^2 \theta) \left(\frac{1}{2} \Delta \epsilon^{(\text{v})} \right) + \left[2 \left[2 \frac{\bar{V}_{\text{s}}^2}{\bar{V}_{\text{p}}} \right]^2 \cos^2 \Phi \sin^2 \theta \right] \left(\frac{1}{2} \Delta \gamma \right), \end{aligned} \quad (33)$$

其中: \bar{V}_{p} , \bar{V}_{s} 和 $\bar{\rho}$ 分别为 HTI 介质上下两层的纵波速度、横波速度以及密度的平均值; ΔV_{p} , ΔV_{s} 和 $\Delta \rho$ 分别为 HTI 介质上下两层的纵波速度、横波速度以及密度的差值; $\Delta \delta^{(\text{v})}$, $\Delta \epsilon^{(\text{v})}$ 和 $\Delta \gamma$ 为上下两层各向异性参数差值, 与裂缝密度和缝隙充填流体有关; θ 和 Φ 分别为入射角和方位角, 与裂缝的发育方向有关.

Bachrach^[30] 对各向异性反射系数进行改写

$$\begin{aligned} R_{\text{pp}}(\theta, \Phi) = & \sec^2 \theta \left[\frac{1}{2} \left[\frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} + \frac{\Delta V_{\text{p}}}{\bar{V}_{\text{p}}} \right] \right] \\ & - 8g \sin^2 \theta \left[\frac{1}{2} \left[\frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} + \frac{\Delta V_{\text{s}}}{\bar{V}_{\text{s}}} \right] \right] + (\cos^2 \Phi \sin^2 \theta) \Delta \Gamma, \end{aligned} \quad (34)$$

其中各向异性梯度项 $\Delta \Gamma$ 定义为:

$$\Delta \Gamma = \left[\frac{1}{2} \Delta \delta^{(\text{v})} + \left[2 \frac{\bar{V}_{\text{s}}^2}{\bar{V}_{\text{p}}} \right]^2 \Delta \gamma \right]. \quad (35)$$

(1) 当裂缝中饱含油水时, 将式(27)代入式(35)得含油水时纵波反射系数为:

$$\begin{aligned} R_{\text{pp}}(\theta, \Phi) = & \sec^2 \theta \left[\frac{1}{2} \left[\frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} + \frac{\Delta V_{\text{p}}}{\bar{V}_{\text{p}}} \right] \right] - 8g \sin^2 \theta \left[\frac{1}{2} \left[\frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} + \frac{\Delta V_{\text{s}}}{\bar{V}_{\text{s}}} \right] \right] \end{aligned}$$

Brown 和 Korringa 流体替换的前提是假设矿物为各向异性的.

$$s_{ijkl}^{\text{sat}} = s_{ijkl}^{\text{dry}} - \frac{(s_{ijaa}^{\text{dry}} - s_{ijaa}^0)(s_{bbkl}^{\text{dry}} - s_{bbkl}^0)}{\phi(\beta_{\text{fl}} - \beta_0) + (s_{cddd}^{\text{dry}} - s_{cddd}^0)}, \quad (31)$$

其中 s_{ijkl}^{dry} 是干岩石的有效弹性柔度, s_{ijkl}^{sat} 是饱和流体岩石的有效弹性柔度, s_{ijkl}^0 是矿物的有效弹性柔度, β_{fl} 是流体的压缩系数, $\beta_{\text{fl}} = 1/K_{\text{fl}}$, β_0 是矿物的压缩系数, $\beta_0 = 1/K_0$, ϕ 是孔隙度. 式(31)可以改写为:

$$s_{ijkl}^{\text{sat}} = s_{ijkl}^{\text{dry}} - \frac{(s_{ijaa}^{\text{dry}} - s_{ijaa}^0)(s_{bbkl}^{\text{dry}} - s_{bbkl}^0)}{(s_{cddd}^{\text{dry}} - s_{cddd}^0) + \phi(1/K_{\text{fl}} - 1/K_0)}. \quad (32)$$

3 流体充填裂缝介质反射系数

基于 Ruger 的 HTI 介质纵波反射系数, 讨论当缝隙中充填不同流体时纵波反射系数与裂缝密度 e 的关系.

$$+ \left[\frac{16g}{3(3-2g)} \cos^2 \Phi \sin^2 \theta \right] \Delta e. \quad (36)$$

(2) 当缝隙中含气时, 将式(28)代入式(35)得含气时纵波反射系数为:

$$\begin{aligned} R_{\text{pp}}(\theta, \Phi) = & \sec^2 \theta \left[\frac{1}{2} \left[\frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} + \frac{\Delta V_{\text{p}}}{\bar{V}_{\text{p}}} \right] \right] - 8g \sin^2 \theta \left[\frac{1}{2} \left[\frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} + \frac{\Delta V_{\text{s}}}{\bar{V}_{\text{s}}} \right] \right] \\ & + \left[\frac{48g - 32g^2 - 12}{3(1-g)(3-2g)} \cos^2 \Phi \sin^2 \theta \right] \Delta e, \end{aligned} \quad (37)$$

其中, $\Delta e = e_2 - e_1$, e_1 和 e_2 分别指裂缝介质上下分层的裂缝密度值.

4 应用分析

选取某碳酸盐岩工区的 A 井为例, 对碳酸盐岩裂缝储层岩石物理模型的建立流程进行验证, 计算纵、横波速度与测井数据进行对比, 提取裂缝储层的 Thomsen 参数, 并分析其各向异性程度.

从图 8a—8b 中可以看出, 通过各向异性岩石物理模型计算的纵波速度和横波速度与测井所得结果

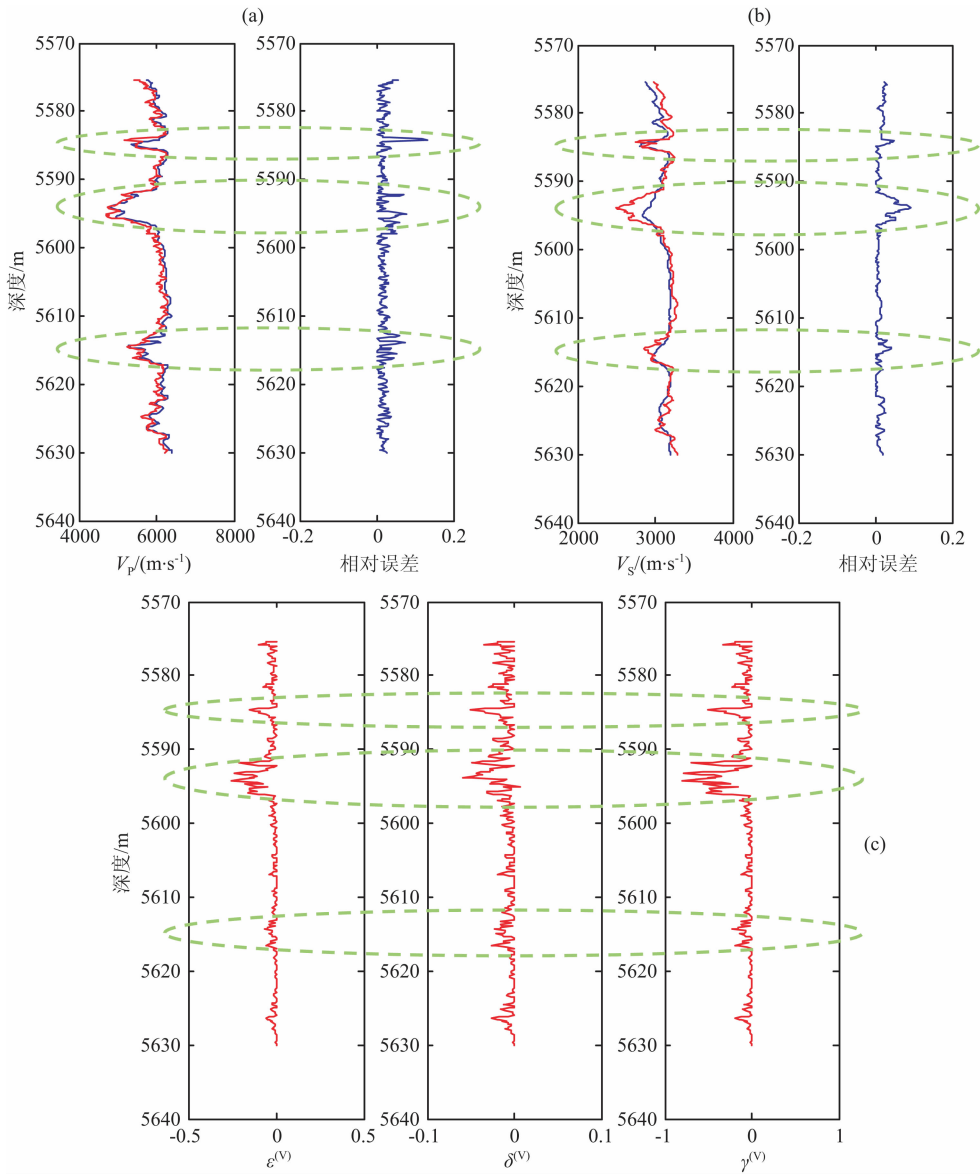


图 8 利用裂缝岩石物理模型估算弹性参数和各向异性参数

(a)纵波速度估算与测井数据对比,红色为估算值,蓝色为测井数据;(b)横波速度估算与测井数据对比,红色为估算值,蓝色为测井数据;(c)Thomsen 参数估算值($\gamma^{(V)} = -\gamma$)。

Fig. 8 Elastic parameters and anisotropic parameters estimated using fracture rock physics model

(a)P wave velocity estimation result comparison with log data, the red line is estimation result, the blue one is logging data;(b)S wave velocity estimation result comparison with log data, the red line is estimation result, the blue one is logging data;(c)Thomsen parameters estimation result ($\gamma^{(V)} = -\gamma$).

相差不大,说明提出的裂缝型碳酸盐岩岩石物理模型构建流程符合要求。图 8c 为预测的 Thomsen 参数, Thomsen 参数绝对值越大说明介质的各向异性程度越强。

图 8 中虚线框所标注的位置纵横波速度要小于临近地层的纵横波速度,而且 Thomsen 各向异性参数的数值变化明显,且 Thomsen 参数绝对值明显高于其它层段,同时参照测井解释信息,可以说明图中所标注位置为裂缝发育层段。

5 结论

本文提出了裂缝型碳酸盐岩岩石物理模型的建立步骤。重点分析了如何在碳酸盐岩岩石骨架中利用 Hudson 模型和 Schoenberg 模型引入裂缝系统,以及 Thomsen 参数、流体指示因子随裂缝密度 e 、纵横波速比和缝隙包含流体的变化特征。

选取碳酸盐岩工区 A 井进行横波速度和各向

异性参数的估算,横波速度的估算结果与测井结果相差不大,且各向异性参数能够较好地反映裂缝发育位置,说明基于碳酸盐岩裂缝岩石物理模型进行横波和各向异性参数估算的可靠性。

由于碳酸盐岩裂缝储层的复杂性,为了更逼近地下介质的真实特征,考虑将基质中添加泥质,以及缝隙中充填方解石的条件进行横波和各向异性参数估算,为地震叠前反演工作提供更加适用的岩石物理资料。

参考文献(References)

- [1] 镇晶晶,刘洋. 裂缝介质岩石物理模型研究综述. 地球物理学进展, 2011, 26(5): 1708-1716.
Zhen J J, Liu Y. Review over physical model of fractured rock medium. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2011, 26(5): 1708-1716.
- [2] 蒋炼,文晓涛,贺振华等. 礁滩储层内部孔隙结构模型模拟与孔隙度预测. 地球物理学报, 2011, 54(6): 1624-1633.
Jiang L, Wen X T, He Z H, et al. Pore structure model simulation and porosity prediction in reef-flat reservoir. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(6): 1624-1633.
- [3] 马淑芳,韩大匡,甘利灯等. 地震岩石物理模型综述. 地球物理学进展, 2010, 25(2): 460-471.
Ma S F, Han D K, Gan L D, et al. A review of seismic rock physics models. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2010, 25(2): 460-471.
- [4] 徐胜峰,李勇根,曹宏. 地震岩石物理研究概述. 地球物理学进展, 2009, 24(2): 680-691.
Xu S F, Li Y G, Cao H. A review of seismic rock physics. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, 24(2): 680-691.
- [5] 吴国忱. 各向异性介质地震波传播与成像. 山东东营: 中国石油大学出版社, 2006: 1-3.
Wu G C. Propagation and Imaging for Seismic Wave in Anisotropic Media (in Chinese). Shandong Dongying: Press of China University of Petroleum, 2006: 1-3.
- [6] 杜启振,杨慧珠. 方位各向异性介质的裂缝预测方法研究. 中国石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(4): 32-36.
Du Q Z, Yang H Z. Detection method for fractures in azimuthally anisotropic media. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)* (in Chinese), 2003, 27(4): 32-36.
- [7] 李录明,罗省贤,王明春等. 各向异性介质三维纵横波联合叠前反演方法及应用. 石油地球物理勘探, 2010, 45(1): 60-65.
Li L M, Luo S X, Wang M C, et al. 3D PP-PS joint inversion method and application in anisotropic medium. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2010, 45(1): 60-65.
- [8] 肖鹏飞,王世星,曲寿利等. 倾角对裂缝密度反演的影响分析. 石油物探, 2009, 48(6): 544-551.
Xiao P F, Wang S X, Qu S L, et al. Analysis on the impact of dip on fracture density inversion. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 2009, 48(6): 544-551.
- [9] Ruger A. Reflection coefficient and azimuthal AVO analysis in anisotropic media [Ph. D. thesis]. Colorado: Colorado School of Mines, 1996.
- [10] Thomsen L. Weak elastic anisotropy. *Geophysics*, 1986, 51(10): 1954-1966.
- [11] 李磊,郝重涛. 横向各向同性介质和斜方介质各向异性参数的约束条件. 地球物理学报, 2011, 54(11): 2819-2830.
Li L, Hao C T. Constraints on anisotropic parameters in transversely isotropic media and the extensions to orthorhombic media. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(11): 2819-2830.
- [12] 杜启振,孔丽云,韩世春. 裂缝诱导各向异性双孔隙介质波场传播特征. 地球物理学报, 2009, 52(4): 1049-1058.
Du Q Z, Kong L Y, Han S C. Wavefield propagation characteristics in the fracture-induced anisotropic double-porosity medium. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(4): 1049-1058.
- [13] 阴可,杨慧珠. 各向异性介质中的 AVO. 地球物理学报, 1998, 41(3): 382-390.
Yin K, Yang H Z. AVO in anisotropic media. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1998, 41(3): 382-390.
- [14] 梁锴,印兴耀,吴国忱. TTI 介质 qP 波入射精确和近似反射透射系数. 地球物理学报, 2011, 54(1): 208-217.
Liang K, Yin X Y, Wu G C. Exact and approximate reflection and transmission coefficient for incident qP wave in TTI media. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(1): 208-217.
- [15] 张广智,郑静静,印兴耀. 基于 Curvelet 变换的多尺度识别裂缝发育带. 石油地球物理勘探, 2011, 46(5): 757-762.
Zhang G Z, Zheng J J, Yin X Y. Identification technology of fracture zone and its strike based on the Curvelet transform. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2011, 46(5): 757-762.
- [16] 李爱山,印兴耀,张繁昌等. VTI 介质中的弹性阻抗与参数提取. 地球物理学进展, 2008, 23(6): 1878-1885.
Li A S, Yin X Y, Zhang F C, et al. Elastic impedance in VTI media and parameter extraction. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2008, 23(6): 1878-1885.
- [17] 齐宇,魏建新,狄帮让等. 横向各向同性介质纵波方位各向异性物理模型研究. 石油地球物理勘探, 2009, 44(6): 671-674.
Qi Y, Wei J X, Di B R, et al. Compressional wave (P-wave) azimuthal anisotropy physical model studies in transversally isotropic medium. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2009, 44(6): 671-674.
- [18] Hudson J A. Overall properties of a cracked solid. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1975, 88(2): 371-384.
- [19] Hudson J A. Wave speeds and attenuation of elastic waves in

- material containing cracks. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1981, 64(1): 133-150.
- [20] Schoenberg M. Elastic wave behavior across linear slip interfaces. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1980, 68(5): 1516-1521.
- [21] Brown R J, Korringa J. On the dependence of the elastic properties of a porous rock on the compressibility of the pore fluid. *Geophysics*, 1975, 40(4): 608-616.
- [22] Sava D. Quantitative data integration for fracture characterization using statistical rock physics [Ph. D. thesis]. California: Stanford University, 2004.
- [23] Backus G E. Long-wave elastic anisotropy produced by horizontal layering. *J. Geophys. Res.*, 1962, 67(11): 4427-4440.
- [24] Schoenberg M, Muir F. A calculus for finely layered anisotropic media. *Geophysics*, 1989, 54(5): 581-589.
- [25] Schoenberg M, Douma J. Elastic wave propagation in media with parallel fractures and aligned cracks. *Geophys. Prospect.*, 1988, 36(6): 571-590.
- [26] Schoenberg M, Protazio J. ‘Zoeppritz’ rationalized and generalized to anisotropy. *Seismic Explor.*, 1992, 1: 125-144.
- [27] Schoenberg M, Sayers C M. Seismic anisotropy of fractured rock. *Geophysics*, 1995, 60(1): 204-211.
- [28] Bakulin A, Grechka V, Tsvankin I. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data-Part I: HTI model due to a single fracture set. *Geophysics*, 2000, 65(6): 1788-1802.
- [29] Gassmann F. Uber die elastizitat poroser medien. *Vier. der Natur. Gesellschaft Zurich*, 1951, 96(1): 1-23.
- [30] Bachrach R, Sengupta M, Salama A, et al. Reconstruction of the layer anisotropic elastic parameters and high resolution fracture characterization from P-wave data: a case study using seismic inversion and Bayesian rock physics parameter estimation. *Geophys. Prospect.*, 2009, 57(2): 253-262.

(本文编辑 何 燕)