

# 致密储层各向异性地震岩石物理建模及应用

印兴耀, 刘倩

(中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580)

**摘要:**针对致密砂岩储层低孔低渗及微裂缝发育的特点,提出一种适合致密孔隙裂缝型储层的岩石物理模型构建方法:首先,在岩石基质中利用有效介质理论添加含流体孔隙,然后利用结合 Hudson 理论和各向异性 Gassmann 理论推导得到的各向异性流体替代方程添加含流体裂缝。基于构建的岩石物理模型,定量分析裂缝密度、裂缝形状、充填流体等储层岩石的物理性质对饱和流体岩石的纵横波速度的影响。采用某研究区实际井资料对该方法进行试算,完成纵横波速度的估算和裂缝储层各向异性参数的提取,纵横波速度的估算值与其实测值的吻合程度较高,且各向异性参数能够较好地反映裂缝发育位置,证明了本文方法的有效性。

**关键词:**致密储层; 岩石物理; 各向异性; 裂缝密度

**中图分类号:**P 631.4      **文献标志码:**A

**引用格式:**印兴耀,刘倩.致密储层各向异性地震岩石物理建模及应用[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(2):52-58.

YIN Xingyao, LIU Qian. Anisotropic rock physics modeling of tight sandstone and applications [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(2): 52-58.

## Anisotropic rock physics modeling of tight sandstone and applications

YIN Xingyao, LIU Qian

(School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** One distinguishing feature of low-porosity and low-permeability sandstones is the departure of their elastic properties from general porous and permeable sands. This paper developed a rock physics model focusing on the developed cracks in tight sandstones and their effects on tight sand. Pores with fluids were added to the rock matrix by using effective media theory, and cracks with fluids were added by using anisotropic fluid substitution equations which were derived by combining Hudson model and anisotropic Gassmann's equations. The elastic modulus in tight sandstones were then calculated with different crack properties, such as crack density, crack shape, fluid content, and so on. The accuracy of the parameters estimation method was discussed based on rock physics model considering micro cracks. P-wave and S-wave velocities were estimated with the proposed modeling method. The accuracy and advantage of the model are verified by comparing with the real logging data. Thomsen parameters of fracture reservoir are extracted and can be used to indicate the cracks in reservoirs.

**Keywords:** tight reservoir; rock physics; anisotropy; fracture density

致密砂岩储层的物性差,矿物组分和孔隙结构非常复杂<sup>[1-3]</sup>,一般为低孔低渗储层,给致密砂岩岩石物理研究工作带来了很大的困难。Rojas<sup>[4]</sup>通过测井数据反演指出,致密砂岩微裂缝可能定向排列,导致速度、电阻率、渗透率的各向异性。Xu等<sup>[5]</sup>指出岩石速度随压力的变化可用于指示微裂缝发育情

况。Smith<sup>[1]</sup>对致密砂岩储层进行了物性及弹性研究,发现骨架中少量微裂缝便可能导致速度的较大变化,且微裂缝的定向排列还会引起致密储层中速度的各向异性。在建模过程中要充分考虑致密储层中由微裂缝引起的各向异性特征。从20世纪70年代起,陆续发展了多种不同的岩石物理理论描述裂

收稿日期:2015-11-17

基金项目:国家“973”计划项目(2013CB228604)

作者简介:印兴耀(1962-),男,教授,博士生导师,研究方向为勘探地球物理理论。E-mail:xyyin@upc.edu.cn。

缝对于岩石性质的影响。Hudson<sup>[6-7]</sup>率先将裂缝的物理参数与等效弹性参数联系,利用宏观的弹性参数表征微观裂缝的特征。Crampin 等<sup>[8-10]</sup>利用 Hudson 理论计算裂缝介质中的弹性波速度并研究其随传播方向的变化规律。Thomsen<sup>[11]</sup>提出了一种在等径孔隙背景下的含裂缝岩石的各向异性表达方式,用于研究裂缝介质的弹性性质<sup>[12-16]</sup>。基于 Gassmann 方程的流体替换是目前工业界应用最为广泛的流体替换方法<sup>[17-19]</sup>。骨架本身的非均匀性和微裂缝引起的各向异性导致 Gassmann 方程对于岩石宏观上均匀、各向同性的假设条件无法满足。Brown 与 Korringa<sup>[20]</sup>考虑微观非均质性及矿物的各向异性对 Gassmann 方程进行扩展。Cardona<sup>[21]</sup>基于 Brown-Korringa 方程提出了一种含裂隙孔隙介质流体替换模型。对于流体饱和裂缝岩石,直接应用 Hudson 模型计算的裂缝是彼此隔离的,流体不能相互流动。低频时波动引起的孔隙压力有足够的时间通过流体流动而平衡,则不能直接应用 Hudson 模型。笔者结合 Hudson 理论和各向异性 Gassmann 理论推导出含流体裂缝介质刚度矩阵中各元素的解析表达式,提出一种致密孔隙裂缝储层的地震岩石物理模型构建方法,基于建立的岩石物理模型分析储层物性参数对含流体等效弹性模量的影响,进行储层的纵、横波速度和各向异性参数的估算。

## 1 方法原理

在岩石物理理论研究中,一般需要将真实的岩石组分及孔隙形态特征进行简化近似,并用一定的模型进行描述<sup>[22]</sup>,正确适用的地震岩石物理模型可以更好地描述储层岩石的特点,也可以进一步指导地震解释工作并降低解释风险。本文中考虑致密砂岩储层孔隙度较低,微裂缝发育的特点,通过构建孔隙裂缝型岩石物理模型,计算裂缝岩石的刚度系数矩阵,进而估算含孔隙裂缝岩石的速度及岩石物理参数。

### 1.1 岩石物理模型构建

针对实际储层进行岩石物理建模的基本思想是:按照弹性介质理论,分析岩石基质的矿物组分与体积分数,计算基质的弹性参数与密度;通过等效介质理论计算岩石骨架模量,根据储层中流体的性质及其分布特征,计算饱和流体岩石模量。根据致密储层的特点,将孔隙系统分为孔隙和裂缝两部分,考虑裂缝引起的各向异性特征,构建致密孔隙裂缝储层岩石物理模型。

(1) 利用 Voigt-Reuss-Hill 平均计算混合矿物

的弹性模量:

$$J_m = \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^N f_i J_i + \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{f_i}{J_i}} \right) \quad (1)$$

式中, $J_m$  为岩石基质的弹性模量(体积模量或剪切模量); $f_i$  与  $J_i$  分别为第  $i$  种矿物的体积分数与弹性模量; $N$  为岩石中所含矿物的种类。

(2) 许多等效介质理论可用以计算低孔隙度且孔隙连通性差的岩石的弹性模量<sup>[2]</sup>。本文中选用 Kuster-Toksöz 理论<sup>[23]</sup>在基质中直接添加含流体孔隙,计算岩石的弹性模量。该理论在低孔隙度的假设条件下考虑了孔隙形状的影响及孔隙之间的相互作用<sup>[24]</sup>。由于岩石孔隙连通性的影响,与测井数据结果相比 Gassmann 方程计算得到的速度结果可能并不合理。因此在孔隙度较低,孔隙连通性较差的情况下,利用有效介质理论考虑孔隙流体的影响会更合适<sup>[2]</sup>。

$$\begin{cases} (K_1 - K_m) \frac{K_m + \frac{4}{3}\mu_m}{K_1 + \frac{4}{3}\mu_m} = \sum_{i=1}^N x_i (K_i - K_m) P, \\ (\mu_1 - \mu_m) \frac{\mu_m + \frac{4}{3}\xi_m}{\mu_1 + \frac{4}{3}\xi_m} = \sum_{i=1}^N x_i (\mu_i - \mu_m) Q. \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\xi_m = \frac{\mu_m (9K_m + 8\mu_m)}{6(K_m + 2\mu_m)}$$

式中, $K_1$  和  $\mu_1$  分别为含孔隙基质的体积模量和剪切模量; $K_m$  和  $\mu_m$  分别为岩石基质的体积模量和剪切模量; $x_i$  为不同孔隙的体积含量; $i$  为不同纵横比孔隙; $P$  和  $Q$  为基质中包含物材料  $i$  形状的表达式<sup>[24]</sup>。

(3) 将上述计算的结果当作含流体孔隙的各向同性背景介质,应用裂缝介质饱和刚度矩阵方程添加含流体裂缝并计算岩石的弹性性质参数。

Hudson 理论基于散射理论给出含裂缝各向异性介质刚度张量的计算公式<sup>[7]</sup>。该理论假设裂缝为具有小孔隙纵横比的薄硬币状,且在介质内部稀疏分布,用裂缝密度参数  $e$  对裂缝储层性质进行描述。由裂缝纵横比  $\alpha_c$  及裂缝孔隙度  $\varphi_c$  参数可计算得到裂缝密度:  $e = \frac{3\varphi_c}{4\pi\alpha_c}$ 。含裂缝介质的弹性矩阵

$C_{ij}^{\text{eff}}$  可表示为

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

式中,  $C^0$  为含孔隙各向同性背景弹性矩阵;  $C^1$  和  $C^2$  分别为含裂缝介质的各向异性一阶和二阶校正量。对于一个单一裂缝组, 一阶校正后的弹性矩阵为  $C^1_{ijpq}$ , 二阶校正量  $C^2_{ijkl}$  可表示为一阶校正的形式:

$$C^0_{ijpq} = \lambda \delta_{ip} \delta_{jq} + \mu (\delta_{ij} \delta_{pq} + \delta_{iq} \delta_{jp}), \quad (4)$$

$$C^1_{ijpq} = -\frac{e}{\mu} C^0_{k3ip} C^0_{l3jq} U_{kl}, \quad (5)$$

$$C^2_{ijkl} = \frac{e^2}{\mu} C^1_{ijrs} \chi_{rstu} C^1_{tukl}. \quad (6)$$

$$\chi_{rstu} = \frac{1}{15} \delta_{rt} \delta_{su} (4 + \tau^2) - (\delta_{rs} \delta_{tu} + \delta_{st} \delta_{ru}) (1 - \tau^2).$$

其中,  $\tau^2 = (\lambda + 2\mu) / \mu$ ;  $\delta_{ij}$  为克罗内克函数; 斜对角矩阵  $U_{kl} = \text{diag} [U_{11}, U_{22}, U_{33}]$  可以反映裂缝的充填状态, 且  $U_{11} = U_{22}$ 。  $U_{11}, U_{33}$  项可表示为

$$U_{11} = \frac{16(\lambda + 2\mu)}{3(3\lambda + 4\mu)} \frac{1}{1 + N}, \quad (7)$$

$$U_{33} = \frac{4(\lambda + 2\mu)}{3(\lambda + \mu)} \frac{1}{1 + k}. \quad (8)$$

其中

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

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

式中,  $K'$  和  $\mu'$  分别为裂缝的体积和剪切模量;  $\lambda$  和  $\mu$  是各向同性背景岩石的 Lamé 参数。对于干燥裂缝, 则  $K' = \mu' = 0$ ,

$$U_{11} = \frac{16(\lambda + 2\mu)}{3(3\lambda + 4\mu)}, \quad (9)$$

$$U_{33} = \frac{4(\lambda + 2\mu)}{3(\lambda + \mu)}. \quad (10)$$

Gassmann<sup>[17]</sup> 提出了一个针对各向同性颗粒组成的各向异性骨架饱和岩石刚度张量计算方法。饱和岩石的刚度张量  $C^{sat}_{ij}$  可以看作是干岩石刚度张量与流体响应项的组合:

$$C^{sat}_{ij} = C^{dry}_{ij} + \alpha_i \alpha_j M, \quad i, j = 1, 2, \dots, 6. \quad (11)$$

其中, 对于  $m = 1, 2, 3$  时,  $\alpha_m = 1 - \sum_{n=1}^3 C^{dry}_{nm} / 3K_g$ , 且  $\alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = 0$ 。

$$M = K_g \left[ \left( 1 - \frac{K^*}{K_g} \right) - \varphi \left( 1 - \frac{K_g}{K_f} \right) \right]^{-1},$$

$$K^* = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 C^{dry}_{ij}.$$

式中,  $C^{dry}_{ij}$  为各向异性的干岩石刚度张量; 标量  $M$  为 Gassmann 孔隙空间模量;  $\varphi$  为岩石裂缝的孔隙度;  $K_g$  为基质的体积模量;  $K_f$  为流体的体积模量。

由式(3)计算的干岩石的刚度张量代入公式(11), 可以得到基于 Hudson 模型和各向异性 Gassmann 方程的裂缝介质饱和刚度张量中每个独立元素的具体解析表达式:

$$C^{sat}_{11} = \frac{L}{D} \left\{ d_1 \theta + \frac{K_f}{\varphi K_g L} \left[ L_1 \alpha' - \frac{16\mu\alpha_0 U_{33} e}{9} \right] \right\}, \quad (12)$$

$$C^{sat}_{33} = \frac{L}{D} \left\{ d_2 \theta + \frac{K_f}{\varphi K_g L} \left[ L_1 \alpha' - \frac{4\mu\alpha_0 U_{33} e}{9} \right] \right\}, \quad (13)$$

$$C^{sat}_{13} = \frac{\lambda}{D} \left\{ d_1 \theta + \frac{K_f}{\varphi K_g L} \left[ \lambda_1 \alpha' - \frac{8\mu\alpha_0 U_{33} e}{9} \right] \right\}, \quad (14)$$

$$C^{sat}_{44} = \mu, \quad (15)$$

$$C^{sat}_{55} = \mu(1 - U_{11} e). \quad (16)$$

其中

$$L = \lambda + 2\mu, \quad \theta = 1 - \frac{K_f}{K_g}, \quad \alpha_0 = 1 - \frac{K}{K_g},$$

$$\alpha' = \alpha_0 + \frac{K^2}{\mu K_g} U_{33} e, \quad \lambda_1 = K_g - \frac{2}{3} \mu, \quad L_1 = K_g + \frac{4}{3} \mu,$$

$$D = 1 + \frac{K_f}{K_g \varphi} \left( \alpha_0 - \varphi + \frac{e K^2 U_{33}}{\mu K_g} \right), \quad d_1 = 1 - L U_{33} e / \mu,$$

$$d_2 = 1 - \frac{\lambda^2}{\mu L} U_{33} e, \quad K = \lambda + \frac{2}{3} \mu.$$

### 1.2 各向异性参数

弹性矩阵确定了应力与应变之间的关系, 但是由其确定的弹性波动方程的系数物理意义不够明确。Thomsen<sup>[25]</sup> 提出了一套物理意义更明确的表征 TI 介质弹性性质的参数:

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{C_{33} - C_{11}}{2C_{11}}, \\ \gamma = \frac{C_{44} - C_{55}}{2C_{55}}, \\ \delta = \frac{(C_{13} + C_{55})^2 - (C_{11} - C_{55})^2}{2C_{11}(C_{11} - C_{55})}. \end{cases}$$

式中,  $\varepsilon$  为度量 qP 波各向异性强度的参数;  $\gamma$  为度量 qS 波各向异性强度的参数;  $\delta$  为连接纵波和横波之间的过渡参数。

含裂缝致密岩石的相速度公式可以用得到的弹性矩阵计算求得, 公式如下所示:

$$V_p(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\rho}} \sqrt{(C_{11} + C_{55}) \sin^2 \theta + (C_{33} + C_{55}) \cos^2 \theta + D(\theta)},$$

$$V_{sv}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\rho}} \sqrt{(C_{11} + C_{55}) \sin^2 \theta + (C_{33} + C_{55}) \cos^2 \theta - D(\theta)},$$

$$V_{sh}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\rho}} \sqrt{C_{66} \sin^2 \theta + C_{44} \cos^2 \theta}.$$

其中

$$D(\theta) = \{ [(C_{11} - C_{55}) \sin^2 \theta - (C_{33} - C_{55}) \cos^2 \theta] + 4(C_{13} + C_{55})^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta \}^{1/2}$$

式中,  $\rho$  为介质的密度;  $V_p$  为 qP 波的相速度;  $V_{SV}$  为 qS 波的相速度;  $V_{SH}$  为 qSH 波的相速度;  $\theta$  为波的传播方向与对称轴之间的夹角。

## 2 应用分析

### 2.1 孔隙裂缝岩石物理参数敏感性分析

本文中的岩石物理模型是针对致密砂岩储层建立的,可以最大程度地描述致密砂岩的储层参数与有效弹性模量的关系,尤其可以表征致密砂岩中的裂缝对于储层弹性性质的影响。利用该模型可以进行岩石物理参数的敏感性分析。岩石物理参数的敏感性分析是充分利用岩石物理模型的基础,可为横波预测等工作提供可靠的依据,有助于指导储层预测、流体识别及地震振幅综合解释。本文中着重分析致密砂岩的速度随裂缝密度、裂缝形状、孔隙裂缝

流体等参数变化的影响。模型计算过程中矿物组成与流体参数如表 1 所示。

表 1 模型中矿物组分与流体参数

Table 1 Properties of mineral constituent and fluid in the model

组分	体积模量 K/GPa	剪切模量 $\mu$ /GPa	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$
石英	48.0	44	2.65
黏土	21.0	7	2.60
地层水	2.5	0	1.03

首先分析孔隙含量对岩石纵横波速度的影响,如图 1 所示。储层总孔隙度(含孔隙和裂缝)设为 0.1。从图中可以看出,岩石的纵横波速度随孔隙含量的增加而降低,而随孔隙纵横比的增加而升高,并且孔隙纵横比较小时对速度的影响越剧烈。

图 2、图 3 分别为波传播方向与裂缝法向成不同夹角的情况下( $0^\circ \sim 90^\circ$ )裂缝密度和裂缝纵横比对纵波速度、横波速度的影响。

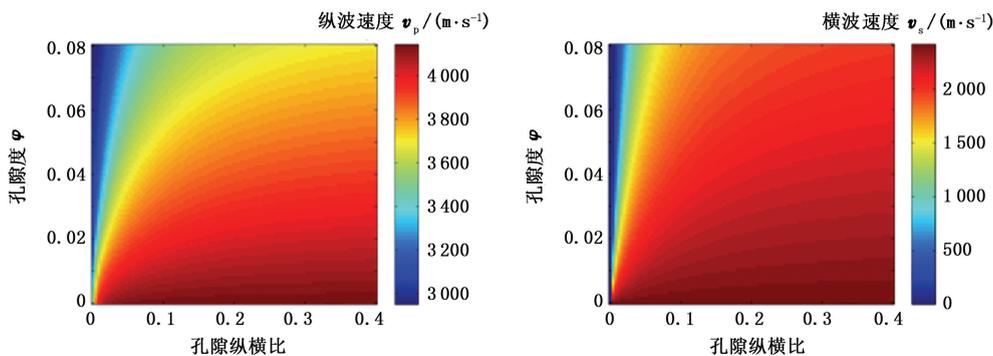


图 1 孔隙含量及孔隙纵横比对纵横波速度的影响

Fig. 1 Influence of porosity volume and aspect ratio on P-and S-wave velocities

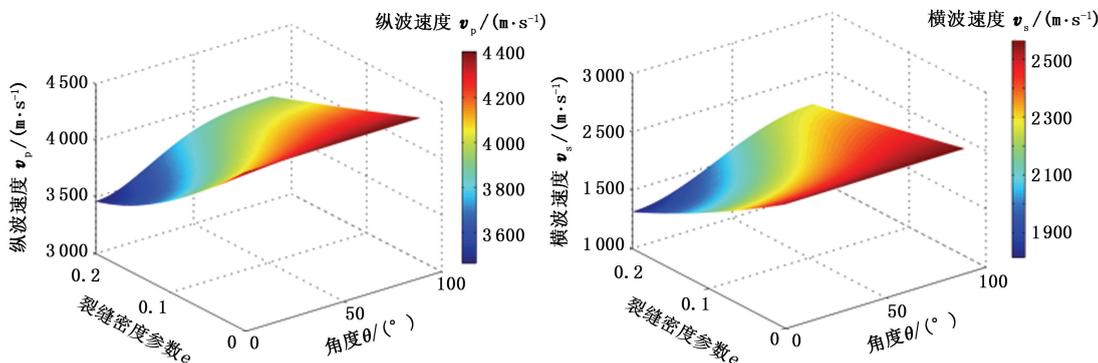


图 2 裂缝密度对纵横波速度的影响

Fig. 2 Influence of crack density on P-and S-wave velocities

图 2 中固定裂缝孔隙纵横比为 0.02,可以看出随裂缝密度的增大,纵横波速度均减小。在平行于裂缝法向传播时,速度对于裂缝密度的变化最敏感,且速度值减小得最快。图 3 中固定裂缝密度参数  $e$

为 0.05,可以看出随裂缝纵横比增大,纵横比速度均减小。在平行于裂缝法向传播时,速度对于裂缝纵横比的变化最敏感,且速度值减小最快。但从图中可以看出,裂缝密度对于速度的影响比裂缝纵横

比要大。

岩石速度在传播方向与裂缝法向成不同夹角的

情况下( $0^\circ \sim 90^\circ$ ),随模型中裂缝流体变化的影响如图4和图5所示。

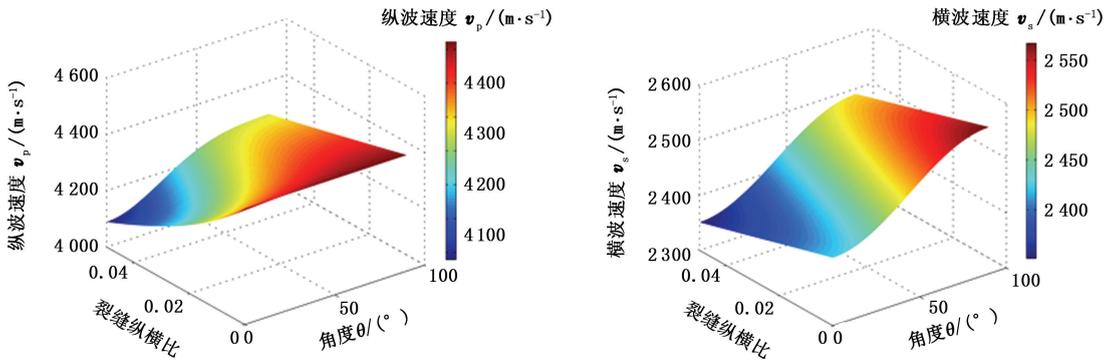


图3 裂缝孔隙形状对纵横波速度的影响

Fig.3 Influence of crack shape on P-and S-wave velocities

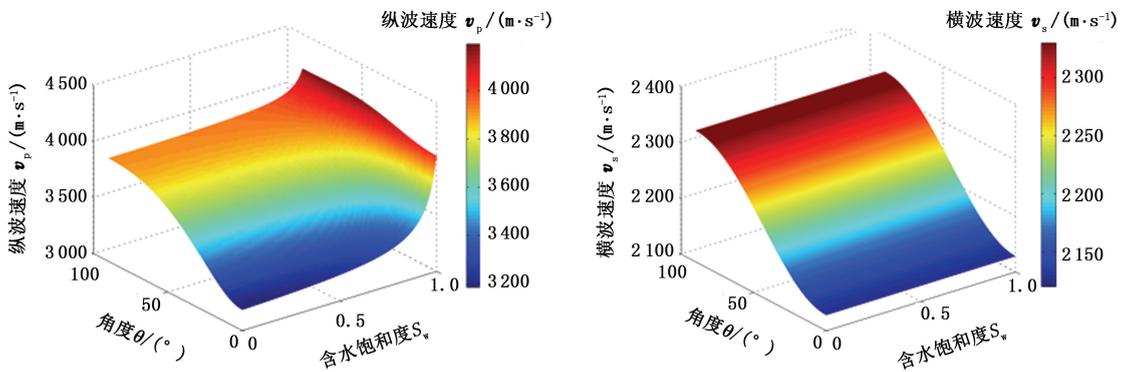


图4 气水混合时含水饱和度对速度的影响

Fig.4 Influence of water saturation on velocities when rock is saturated with gas and water

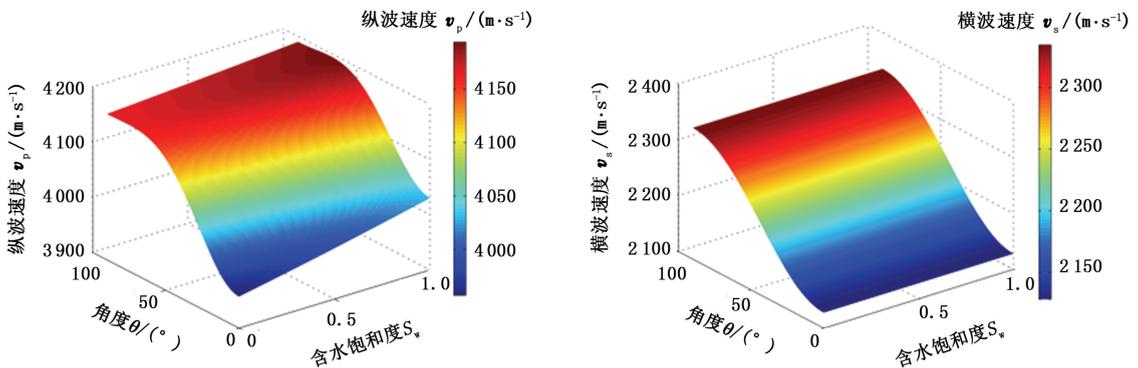


图5 油水混合时含水饱和度对速度的影响

Fig.5 Influence of water saturation on velocities when rock is saturated with oil and water

在分析流体影响时,假设岩石中裂缝密度参数  $e$  为 0.08,裂缝纵横比为 0.02,岩石矿物成分含量相等。图4表示纵波速度、横波速度在气水饱和条件下随裂缝中含水饱和度变化的曲线。从图中可见,气水饱和岩石的纵波速度随着含水饱和度的增加而增加,当含水饱和度低于 90% 的时候,增加较为缓慢,而接近于 100% 时,即含气非常少的时候,纵波速度快速增加。这是由于气体的体积模量与油水相

比较小,使得等效介质的体积模量减少量较大,因而裂缝中一旦含气则纵波速度陡然下降。在平行于裂缝法向传播时,速度对于含水饱和度的变化最敏感,且速度值减小得最快。横波速度对于流体的变化不敏感,略有增加。图5表示纵波速度、横波速度在油水饱和条件下随含水饱和度变化的曲线。可以看出,油水饱和岩石的纵、横波速度随着含水饱和度的增加而增加,在平行于裂缝法向传播时速度对于含

水饱和度的变化最敏感,且速度值减小得最快。

### 2.2 实际资料应用分析

通过构建的地震岩石物理等效模型,可以进行纵横波速度及裂缝岩石物理参数的预测,不仅可以弥补测井数据横波速度缺失的不足,而且可以通过裂缝岩石物理参数的变化特征从测井数据上有效地识别裂缝发育位置,为地震反演及储层预测提供依据。

选取中国西部某致密砂岩研究区,该研究区储层为低孔低渗储层,以其中一口井的实际资料为例,对建立的致密砂岩裂缝储层岩石物理模型进行验证,计算纵、横波速度并与实际测井数据进行对比,估测储层的各向异性参数并进行分析。

图6中红色为估测值,蓝色为测井真实值。可以看出,通过本文中提出的岩石物理模型计算的纵波速度和横波速度与测井结果相差不大,说明提出的致密砂岩岩石物理模型构建流程符合要求。图7为预测的各向异性参数及杨氏模量值,各向异性参数绝对值越大,说明介质的各向异性程度越强。图中标注位置为该井储层位置。可以看出,该位置处杨氏模量值偏大;各向异性参数变化剧烈,且其绝对值明显高于其他层段,同时依据测井解释资料,可以认为此处为裂缝发育带,且缝隙中饱含气,为有效致密裂缝储层。

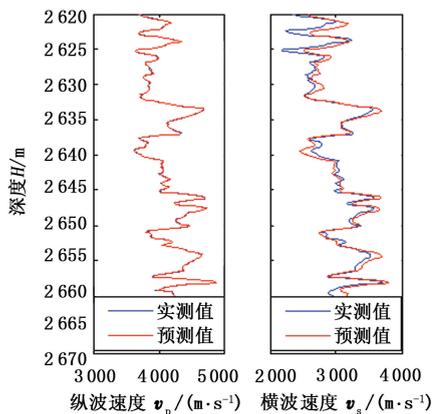


图6 估测速度与实际速度对比

Fig.6 Comparison of estimated velocities and real velocities

基于构建的岩石物理模型可以建立相应的岩石物理模版。综合分析研究区的测井、岩心等数据,选取符合已有数据的基本参数,建立岩石物理模版如图8所示。图中模版的横坐标是纵波阻抗( $I_p$ ),纵坐标是纵横波速度比,孔隙度的范围是0.02~0.10,泥质含量的范围是0.2~0.6,含水饱和度的范围是0~1。将该井的纵波阻抗和纵横波速度比数据交会在模版中,用含气饱和度值作为点的颜色。从图中可以看出,储层段数据点的含气饱和度变化情况与模版中的

流体变化趋势基本一致,证明了本文中建立的岩石物理模型的合理性。岩石物理模版可以将储层岩石物理参数变化引起的储层测井参数及地球物理响应特征的变化联系起来,为下一步的储层描述提供理论依据。

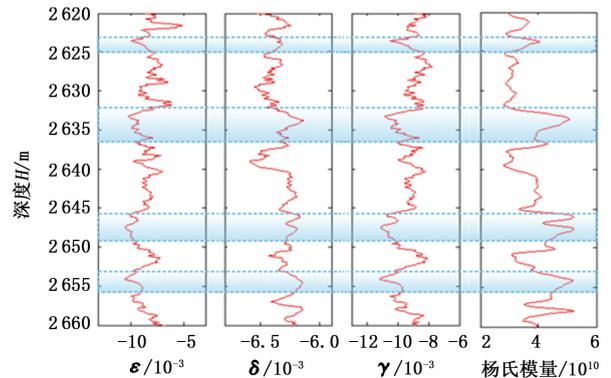


图7 估测的各向异性参数及杨氏模量值

Fig.7 Estimated logs of anisotropic parameters and Young's modulus

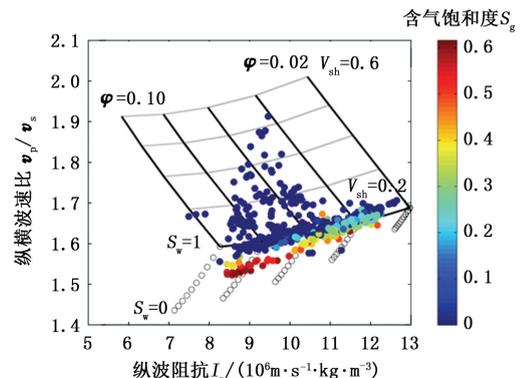


图8 利用本文模型建立的岩石物理模版

Fig.8 Rock physics template built with proposed model

## 3 结论

(1)提出了一种结合 Hudson 理论和各向异性 Gassmann 理论的各向异性流体替代方程,推导出含流体裂缝介质刚度矩阵中每个独立元素的表达式。在此基础上提出了一种各向异性的致密孔隙裂缝储层岩石物理模型构建方法,从而进行纵、横波速度及各向异性参数的估算。

(2)对提出的岩石物理模型,随裂缝密度的增大、裂缝纵横比的减小,纵横波速度呈减小的趋势,且在平行于裂缝法向传播时,速度对其变化最敏感,且速度值减小得最快。

(3)应用某研究区的实际测井资料计算得到的纵横波速度和实测值的吻合程度较高,各向异性参数能够较好地反映裂缝发育位置,且岩石物理模版

中流体的变化趋势与实际资料相一致,证明了提出的方法对于各向异性致密储层的有效性。

### 参考文献:

- [1] SMITH T M, SAYERS C M, SONDERGELD C H. Rock properties in low-porosity/low-permeability sandstones [J]. *The Leading Edge*, 2009,28(1):48-59.
- [2] RUIZ F, CHENG A. A rock physics model for tight gas sand [J]. *The Leading Edge*, 2010, 29(12):1484-1489.
- [3] NORTH F K. *Petroleum geology* [M]. Boston: Allen & Unwin, 1985:607.
- [4] ROJAS E. Elastic rock properties of tight gas sandstones for reservoir characterization at Rulison field [M]. Colorado: MS thesis, Colorado School of Mines, 2005.
- [5] XU X, TSVANKIN I. Anisotropic geometrical-spreading correction for wide-azimuth P-wave reflections [J]. *Geophysics*, 2006,71(5):D161-D170.
- [6] HUDSON J A. Wave speeds and attenuation of elastic wave in material containing cracks [J]. *Geophysical Journal International*, 1981,64(1):133-150.
- [7] HUDSON J A. A higher order approximation to the wave propagation constants for a cracked solid [J]. *Geophysical Journal International*, 1986,87(1):265-274.
- [8] CRAMPIN S, BAMFORD D. Inversion of P-wave velocity anisotropy [J]. *Geophysical Journal International*, 1977, 49(1):123-132.
- [9] CRAMPIN S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic-media [J]. *Wave Motion*, 1981(3):343-391.
- [10] CRAMPIN S. Effective anisotropic elastic constants for wave propagation through cracked solids [J]. *Geophysical Journal International*, 1984,76(1):135-145.
- [11] THOMSEN L. Elastic anisotropy due to aligned cracks in porous rock [J]. *Geophysical Prospecting*, 1995,43(6):805-829.
- [12] BAKULIN A. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data-Part I: HTI model due to a single fracture set [J]. *Geophysics*, 2000,65(6):1788-1802.
- [13] 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 [J]. *地球物理学报*, 2011, 54(11):2819-2830.  
LI Lei, HAO Chongtao. Constraints on anisotropic parameters in transversely isotropic media and the extensions to orthorhombic media [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011,54(11):2819-2830.
- [14] 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 [J]. *石油地球物理勘探*, 2009,44(6):671-674.  
QI Yu, WEI Jianxin, DI Bangrang, et al. Compression-al wave (P-wave) azimuthal anisotropy physical model studies in transversally isotropic medium [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2009,44(6):671-674.
- [15] GUREVICH B. Elastic properties of saturated porous rocks with aligned fractures [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2003,54(3):203-218.
- [16] BACHRACH R, SENGUPTA M, SALAMA A, et al. Reconstruction of the layer anisotropic elastic parameter and high resolution fracture characterization from P-wave data: a case study using seismic inversion and Bayesian rock physics parameter estimation [J]. *Geophysical Prospecting*, 2009,57(2):253-262.
- [17] GASSMANN F. Über die elastizität, poröser medien [J]. *Vier der Natur Gesellschaft Zurich*, 1951,96:1-23.
- [18] MAVKO G, MUKERJI T. Seismic pore space compressibility and Gassmann's relation [J]. *Geophysics*, 1995,60(6):1743-1749.
- [19] SIL S, SEN M K, GUREVICH B. Analysis of fluid substitution in a porous and fractured medium [J]. *Geophysics*, 2011,76(3):WA157-WA166.
- [20] BROWN R, KORRINGA J. On the dependence of the elastic properties of a porous rock on the compressibility of the pore fluid [J]. *Geophysics*, 1975,40:608-616.
- [21] CARDONA R. Two theories for fluid substitution in porous rocks with aligned cracks [C/OL]// 2002 SEG Annual Meeting, Salt Lake City, Utah, October 6-11, 2002; SEG Technical Program Expanded Abstracts [2015-10-12]. [http:// library. seg. org/doi/abs/10. 1190/1. 1817016](http://library.seg.org/doi/abs/10.1190/1.1817016).
- [22] 镇晶晶,刘洋. 裂缝介质岩石物理模型研究综述 [J]. *地球物理学进展*, 2011,26(5):1708-1716.  
ZHEN Jingjing, LIU Yang. Review over physical model of fractured rock medium [J]. *Progress in Geophysics*, 2011,26(5):1708-1716.
- [23] KUSTER G T, TOKSÖZ M N. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media [J]. *Geophysics*, 1974,39(5):587-618.
- [24] MAVKO G, MUKERJI T, DVORKIN J. *The rock physics handbook: tools for seismic analysis of porous media* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998: 219-224.
- [25] THOMSEN L. Weak elastic anisotropy [J]. *Geophysics*, 1986,51(10):1954-1966.

(编辑 修荣荣)