

# 考虑挤喷效应的流体因子弹性阻抗直接反演方法及应用

——以渤海湾某裂缝发育储层为例

瞿晓阳<sup>1</sup>, 瞿禹政<sup>2</sup>, 魏猛<sup>1</sup>

(1. 中石化重庆页岩气有限公司, 重庆 408400;

2. 泰州油恒油气工程服务有限公司, 泰州 225300)

**摘要:** 流体因子是识别孔隙流体和确定油气藏空间展布的重要依据。随着地球物理勘探向复杂化、精细化方向发展, 储层解释面临的挑战也急剧增大。微观孔隙介质理论指出, 地下岩石中发育大量力学性质不均一的孔隙和裂缝, 当地震波传播时, 赋存在较软的裂缝中的流体受挤压作用会喷射到相邻的硬孔隙中, 产生挤喷现象, 对流体流动和岩石受力产生一定的影响。常规 Russell 流体因子建立 Biot 理论的基础上, 对孔隙流体流动的特征不够充分, 可能带来一定的油气解释误差。因此, 近年来发展出一种考虑挤喷效应的流体因子, 提高了薄层流体识别的可靠性。本研究验证了考虑挤喷效应的  $K_{fs}$  流体因子反射方程的 AVO 特性, 并根据弹性阻抗反演思路, 提出了  $K_{fs}$  流体因子弹性阻抗直接反演方法, 提高了  $K_{fs}$  流体因子预测的稳定性, 为叠前地震流体识别提供了新思路。

**关键词:** 流体因子; 挤喷效应; 弹性阻抗反演

中图分类号: P631

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.05.06

## 0 引言

叠前地震数据保留了地震反射振幅随偏移距变换的信息, 为实现储层岩性预测及流体识别提供了良好的数据基础。自 Smith<sup>[1]</sup> 首先提出流体因子的概念后, 为了更好地评价储层含油气性, 大量地球物理学者针对流体因子展开了研究, 陆续提出纵横波反射系数加权项<sup>[2-3]</sup>、 $\lambda\rho$  流体因子<sup>[4-5]</sup>、岩石孔隙空间模量<sup>[6-7]</sup>、Gassmann 流体相<sup>[8]</sup> 等一系列流体因子, 满足了不同地质条件的储层油气解释需要。本世纪以来, Russell 流体因子因其油气高灵敏度逐渐受到地球物理学家的青睐<sup>[9-10]</sup>, 发展出一系列包含 Russell 流体因子的反射系数 AVO 近似式<sup>[11-12]</sup>, 大大提高了储层油气解释的可靠性和稳定

性。然而, 随着地球物理勘探向复杂油气藏发展, 储层流体识别的难度越来越大, 亟须发展出对流体流动表征更为敏感的流体指示因子。因此, 部分学者将流体微观挤喷效应<sup>[13]</sup> 考虑进来, 提出了  $\rho f$  流体因子<sup>[14]</sup>、 $K_{fs}$  流体因子<sup>[15]</sup>, 对复杂储层流体预测、刻画储层空间展布和降低勘探风险具有十分重要的指导意义和实际应用前景。

为了提高地震反演的稳定性, 自 Connolly<sup>[16]</sup> 提出弹性阻抗反演概念后, 弹性阻抗反演方法得到了深入研究<sup>[17-20]</sup>。弹性阻抗反演方法通过叠后反演思路将不同角度的地震数据转化为弹性阻抗数据, 结合不同角度的地震子波, 根据弹性阻抗反演目标泛函提取地下介质的物性参数和流体信息。弹性阻抗反演方法实现了层间反射系数信息向层内弹性阻抗的过渡, 具有计算效率高、抗噪性强的优点。时至

今日,不少学者基于弹性阻抗反演实现了模型参数的稳定反演,如拉梅参数弹性阻抗反演<sup>[21]</sup>、Russell 流体因子弹性阻抗反演<sup>[22]</sup>、纵横波模量弹性阻抗反演<sup>[23]</sup>、裂缝岩石物理参数的方位各向异性弹性阻抗反演等<sup>[24]</sup>,在储层物性参数评价、地下油气分布预测方面取得了有效的应用。然而,针对  $K_{fs}$  流体因子提取目前停留在叠前地震反演方法上,难以解决反射波同相轴不均匀的问题,因此,需要将  $K_{fs}$  流体因子扩展到弹性阻抗反演领域,进而提高流体的识别的可靠性。

笔者从固液解耦的  $K_{fs}$  流体因子与地震反射系数关系出发,推导出含  $K_{fs}$  流体因子的五参数弹性阻抗方程,提出了  $K_{fs}$  流体因子的叠前地震弹性阻抗直接提取方法,并用于储层流体识别。实际工区交汇分析与反演结果表明,相较于常规 Gassmann 流体因子反演,  $K_{fs}$  流体因子弹性阻抗反演方法能够较好地反映岩石内孔隙流体的变化对波传播产生的影响,进一步提高了储层流体识别的准确度和可靠性。

## 1 技术方法

### 1.1 考虑微观挤喷效应的反射系数近似方程

宏观 Biot-Gassmann 孔隙介质理论建立了岩石骨架、基质、孔隙度和流体参数之间的关系,阐述了弹性波在双相介质中的传播运动关系。低频条件下的快速纵波和横波则由 Gassmann 方程<sup>[25]</sup>所决定。这时的波速为:

$$V_P = \sqrt{\frac{K_{sat} + \frac{4\mu_{sat}}{3}}{\rho}} \quad (1)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu_{sat}}{\rho}} \quad (2)$$

式中,  $V_P$  和  $V_S$  分别为双相介质中的纵横波速度,  $K_{sat}$  为饱和岩石的体积模量,  $\mu_{sat}$  为饱和岩石的剪切模量,  $\rho$  为饱和岩石的密度。其中饱和条件下的体模量  $K_{sat}$  由 Gassmann 公式<sup>[25]</sup>给出:

$$K_{sat} = K_d + \frac{\alpha^2}{\frac{\alpha - \phi}{K_s} + \frac{\phi}{K_f}} \quad (3)$$

式中,  $K_d$ 、 $K_s$  和  $K_f$  分别为干岩石骨架、岩石基质和孔隙流体的体积模量,  $\phi$  为孔隙度,  $\alpha$  为 Biot 参数。

基于该理论, Russell 等人对饱和流体多孔介质

的 AVO 理论进行了研究,首次提出了包含 Gassmann 流体项的反射系数近似公式:

$$R_{PP}(\theta) = \left[ \left( 1 - \frac{\gamma_{dry}^2}{\gamma_{sat}^2} \right) \frac{\sec^2 \theta}{4} \right] \frac{\Delta f}{f} + \left[ \frac{\gamma_{dry}^2}{4\gamma_{sat}^2} \sec^2 \theta - \frac{2}{2\gamma_{sat}^2} \sin^2 \theta \right] \frac{\Delta \mu}{\mu} + \left[ \frac{1}{2} - \frac{\sec^2 \theta}{4} \right] \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (4)$$

式中,  $R_{PP}$  为快纵波反射系数,  $\theta$  表示入射角,  $\gamma_{dry}$ 、 $\gamma_{sat}$  分别为干岩石、饱和岩石的纵横波速度比,  $f$  为 Russell 流体因子。

宏观 Biot 理论仅考虑了流固相对运动时的摩擦,对孔隙流体的运动表征不够充分。微观孔隙介质理论指出,当地震波传播到含有裂缝的孔隙介质中,岩石孔裂隙间的压力梯度会驱使裂缝中的流体喷射到较硬的孔隙中,形成“挤喷流动”现象,对孔隙流体压力产生局部影响。

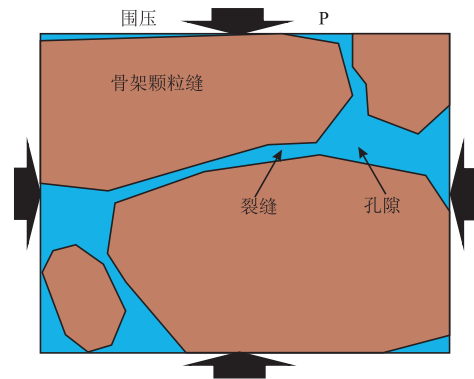


图1 含孔隙、裂缝岩石的挤喷效应分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of squirt flow analysis of rock with pores and cracks

考虑图 1 中的挤喷流动模型,模型外部受到的围压为  $P$ 。当地震波传播到该岩石模型时,围压产生一个压力增量  $\Delta P$ ,此时,孔裂隙的体积  $V_f$  被压缩,引起流体压力变化  $\Delta P_f$ ,二者之间的关系为<sup>[26]</sup>:

$$\Delta P_f = \frac{\frac{1}{K_d} - \frac{1}{K_{sat}}}{\frac{1}{K_d} - \frac{1}{K_s}} \Delta P \quad (5)$$

流体的体积压缩变化可以进一步分解为孔隙和裂隙部分的贡献:

$$\Delta V_f = \Delta V_p + \Delta V_c \quad (6)$$

其中,  $\Delta V_f$  可以通过 Gassmann 方程与干岩石骨架、岩石基质模量及孔隙度联系起来:

$$\frac{\Delta V_f}{V_f} = \frac{\frac{1}{K_d} - \frac{1}{K_s}}{\phi} (\Delta P - \Delta P_f) + \frac{1}{K_s} \Delta P_f \quad (7)$$

式(6)右边第一项的孔隙流体压缩可以表征为

孔隙流体压力变化与流体压缩模量的比值,第二项为挤喷流的来源。假设孔隙流体不可压缩,则围压变化下从裂隙挤入孔隙的流量记为  $q$ 。联立上述各式,可以得到:

$$\frac{1}{K_d} - \frac{1}{K_{sat}} \left( \frac{\Delta P}{\Delta P_f} - 1 \right) + \frac{1}{K_s} = \frac{1}{K_f} \frac{\Delta P_p V_p}{\Delta P_f V_f} + \frac{q}{\Delta P_f V_f} \quad (8)$$

假设双相介质中裂隙体积远小于孔隙体积,低频条件下,考虑挤喷效应后的 Gassmann 方程可以表示为<sup>[27]</sup>:

$$K_{sat} = K_d + \frac{\alpha^2}{\frac{\alpha - \phi}{K_s} + \frac{\phi}{K_f} + S(\omega)} \quad (9)$$

$$\mu_{sat} = \left[ \frac{1}{\mu_0} + \frac{4}{15} \left( \frac{1}{K_{sat}} - \frac{1}{K_d} \right) \right]^{-1} \quad (10)$$

式中,  $\mu_{sat}$  为饱和岩石的剪切模量,  $\mu_0$  为不发生挤喷流动下的饱和岩石剪切模量,  $S(\omega)$  表示裂缝中的挤喷效应影响。

为了提高储层流体识别的可靠性,王玉荣<sup>[15]</sup>将微观挤喷效应补充到双相介质反演中,发展出考虑挤喷流的流体因子  $K_{fs}$  反射系数近似方程:

$$R_{PP}(\theta) = \left[ \left( 1 - \frac{\gamma_{dry}^2}{\gamma_{sat}^2} \right) \frac{\sec^2 \theta}{4} \right] \frac{\Delta K_{fs}}{K_{fs}} + \left[ \frac{\gamma_{dry}^2}{4\gamma_{sat}^2} \sec^2 \theta - \frac{2}{\gamma_{sat}^2} \sin^2 \theta \right] \frac{\Delta \mu_s}{\mu_s} + \left[ \frac{1}{2} - \frac{\sec^2 \theta}{4} \right] \frac{\Delta \rho}{\rho} + \left( \frac{\sec^2 \theta}{4} - \frac{\gamma_{dry}^2}{2\gamma_{sat}^2} \sec^2 \theta + \frac{2}{\gamma_{sat}^2} \sin^2 \theta \right) \frac{\Delta \phi}{\phi} + \left( -\frac{2}{\gamma_{sat}^2} \sin^2(\theta) + \frac{\sec^2 \theta}{4} \right) \frac{\Delta S}{S} \quad (11)$$

式中,  $S = 1 + S(\omega)M$ ,  $\frac{1}{M} = \frac{\beta - \phi}{K_s} + \frac{\phi}{K_f}$ ,  $K_{fs} = \frac{K_f}{S}$ ,  $\mu_s = \phi \mu_{sat}$ ,  $\beta$  为 Biot 参数。

表 1 给出了含水砂层含气砂层分界面模型的岩石物理参数,下面使用表 1 的孔隙介质模型参数对 Russell 近似式、考虑挤喷效应的流体因子近似式进行了简单的精度分析,如图 2 所示:

表 1 分界面模型的岩石物理参数

Tab. 1 Petrophysical parameters of interface model

参数	$K_s$ /GPa	$\mu_s$ /GPa	$K_d$ /GPa	$\mu_d$ /GPa	$\rho_s$ /(Kg/m <sup>3</sup> )	$\phi$	$\rho_f$ /(Kg/m <sup>3</sup> )	$\kappa$ /mD
介质 1	25.68	7.42	7.49	5.67	2 500	0.16	1 020	200
介质 2	38.0	7.61	16.9	13.96	2 760	0.2	940	1 200

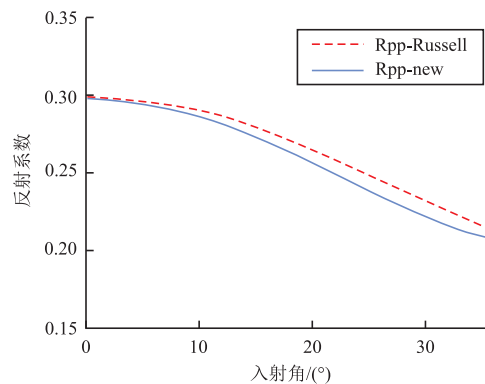


图 2 反射系数近似式精度对比

Fig. 2 Reflection coefficient approximation precision comparison

图中,红色虚线为 Russell 近似式计算的反射系数曲线,蓝色实线为考虑挤喷效应的反射系数近似方程。从图 2 中可以看出,尽管两种近似式得到的反射系数曲线在趋势上保持一致,但由于新的反射系数近似式比 Russell 近似式多考虑了挤喷效应影响,因此从 0° 入射角开始,两条反射系数曲线在数值上存在一定的差异。另一方面,考虑挤喷效应

影响的反射系数近似式表现出更好的 AVO 特征,为流体因子叠前反演奠定了良好的理论基础。

下面对考虑挤喷流的流体因子  $K_{fs}$  反射系数近似方程开展了参数敏感度分析,研究中用控制变量法分别对  $K_{fs}$ 、 $\mu_s$ 、 $\rho$ 、 $\phi$ 、 $S$  这 5 个参数进行了分析,每个参数从 50% 变化到 150%,得到以下分析敏感度分析图件,如图 3 所示:

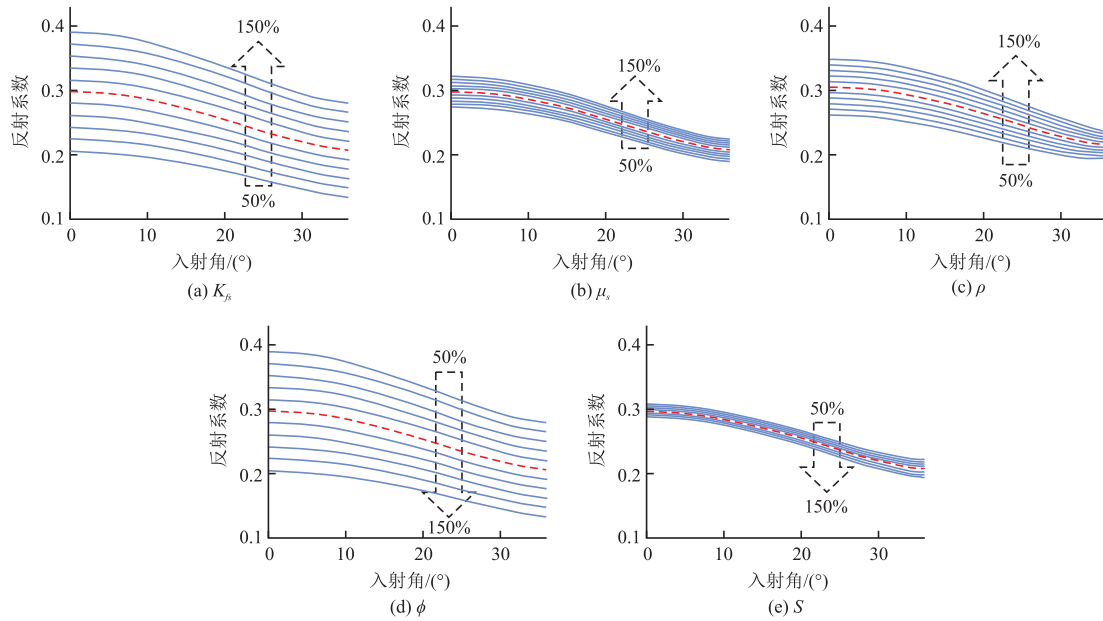


图3 考虑挤喷效应的反射系数近似式参数敏感度分析

Fig. 3 Approximate parameter sensitivity analysis of reflection coefficient considering squeezing effect

图3中可以看到,在 $0^\circ \sim 36^\circ$ 的小角度范围中,反射系数近似方程中的参数 $K_{fs}$ 、 $\rho$ 、 $\phi$ 具有较高的敏感性,满足AVO反演的要求,证明了开展 $K_{fs}$ 流体因子反演的合理性。

1.2 考虑微观挤喷效应的流体因子弹性阻抗反演方法

弹性阻抗反演方法有助于提高流体因子预测的稳定性,下面将考虑挤喷效应的反射系数近似方程(式11)推导为弹性阻抗反演方程。反射系数用弹性阻抗近似表示为<sup>[16]</sup>:

$$R_{pp}(\theta) \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta EI}{EI} \approx \frac{1}{2} \Delta \ln(EI) \quad (12)$$

上式代入反射系数近似式(式12),则对数形式的弹性参数相对变化量为:

$$\begin{aligned} \Delta \ln(EI) = & \Delta \ln(K_{fs}) \left(1 - \frac{\gamma_{dry}^2}{\gamma_{sat}^2}\right) \frac{\sec^2 \theta}{2} + \\ & \Delta \ln(\mu_s) \frac{\frac{\gamma_{dry}^2}{2\gamma_{sat}^2} \sec^2 \theta - \frac{4}{\gamma_{sat}^2} \sin^2 \theta}{2} + \Delta \ln(\rho) \left(1 - \frac{\sec^2 \theta}{2}\right) + \\ & \Delta \ln(\phi) \left(\frac{\sec^2 \theta}{2} - \frac{\gamma_{dry}^2}{\gamma_{sat}^2} \sec^2 \theta + \frac{4}{\gamma_{sat}^2} \sin^2 \theta\right) + \\ & \Delta \ln(S) \left(-\frac{4}{\gamma_{sat}^2} \sin^2 \theta + \frac{\sec^2 \theta}{2}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

两边取积分并令积分常数为0,整理可得:

$$EI = K_{fs}^{a(\theta)} \cdot \mu_s^{b(\theta)} \cdot \rho^{c(\theta)} \cdot \phi^{d(\theta)} \cdot S^{e(\theta)} \quad (14)$$

其中,

$$a = \left(1 - \frac{\gamma_{dry}^2}{\gamma_{sat}^2}\right) \frac{\sec^2 \theta}{2}, b = \frac{\gamma_{dry}^2}{\gamma_{sat}^2} \frac{\sec^2 \theta}{2} - \frac{4}{\gamma_{sat}^2} \sin^2 \theta$$

$$c = 1 - \frac{\sec^2 \theta}{2}, d = \frac{\sec^2 \theta}{2} - \frac{\gamma_{dry}^2}{\gamma_{sat}^2} \sec^2 \theta + \frac{4}{\gamma_{sat}^2} \sin^2 \theta$$

$$e = -\frac{4}{\gamma_{sat}^2} \sin^2(\theta) + \frac{\sec^2 \theta}{2}$$

为了缓解弹性阻抗的数值量纲随角度剧烈变化的问题,式(14)中引入 $EI$ 、 $K_{fs}$ 、 $\mu_s$ 、 $\rho$ 、 $\phi$ 、 $S$ 的平均值 $EI_0$ 、 $K_{fs0}$ 、 $\mu_{s0}$ 、 $\rho_0$ 、 $\phi_0$ 、 $S_0$ 这5个常数,可以得到标准化的弹性阻抗方程:

$$\frac{EI}{EI_0} = \left(\frac{K_{fs}}{K_{fs0}}\right)^{a(\theta)} \cdot \left(\frac{\mu_s}{\mu_{s0}}\right)^{b(\theta)} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{c(\theta)} \cdot \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^{d(\theta)} \cdot \left(\frac{S}{S_0}\right)^{e(\theta)} \quad (15)$$

对公式(15)进行对数变换,可以将非线性指数关系转为线性形式,以简化求解算法:

$$\begin{aligned} \ln \frac{EI}{EI_0} = & a(\theta) \ln \left(\frac{K_{fs}}{K_{fs0}}\right) + b(\theta) \ln \left(\frac{\mu_s}{\mu_{s0}}\right) + \\ & c(\theta) \ln \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) + d(\theta) \ln \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right) + e(\theta) \ln \left(\frac{S}{S_0}\right) \end{aligned} \quad (16)$$

假设一道地震数据的采样点数为n,将测井曲线与井旁道进行尺度匹配后,通过井曲线与井上EI曲线可以构建如下矩阵:

$$\begin{bmatrix} \ln \frac{K_{fs}(t_1)}{K_{fs0}} & \ln \frac{\mu_s(t_1)}{\mu_{s0}} & \ln \frac{\rho(t_1)}{\rho_0} & \ln \frac{\phi(t_1)}{\phi_0} & \ln \frac{S(t_1)}{S_0} \\ \ln \frac{K_{fs}(t_2)}{K_{fs0}} & \ln \frac{\mu_s(t_2)}{\mu_{s0}} & \ln \frac{\rho(t_2)}{\rho_0} & \ln \frac{\phi(t_2)}{\phi_0} & \ln \frac{S(t_2)}{S_0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \ln \frac{K_{fs}(t_n)}{K_{fs0}} & \ln \frac{\mu_s(t_n)}{\mu_{s0}} & \ln \frac{\rho(t_n)}{\rho_0} & \ln \frac{\phi(t_n)}{\phi_0} & \ln \frac{S(t_n)}{S_0} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} a(\theta) \\ b(\theta) \\ c(\theta) \\ d(\theta) \\ e(\theta) \end{cases} = \begin{cases} \ln \frac{EI(t_1, \theta)}{EI_0} \\ \ln \frac{EI(t_2, \theta)}{EI_0} \\ \vdots \\ \ln \frac{EI(t_n, \theta)}{EI_0} \end{cases} \quad (17)$$

求解上式即可得到适用于研究工区的系数  $a(\theta_i)$ 、 $b(\theta_i)$ 、 $c(\theta_i)$ 、 $d(\theta_i)$ 、 $e(\theta_i)$  ( $i=1, 2, \dots, 5$ ) 的数值, 将这些系数代入方程(16), 即可得到任意采样点处的  $K_{fs}$  弹性阻抗方程组<sup>[28]</sup>:

$$\begin{cases} \ln \frac{EI(\theta_1)}{EI_0} = a(\theta_1) \ln \frac{K_{fs}}{K_{fs0}} + b(\theta_1) \ln \frac{\mu_s}{\mu_{s0}} + c(\theta_1) \ln \frac{\rho}{\rho_0} + d(\theta_1) \ln \frac{\phi}{\phi_0} + e(\theta_1) \ln \frac{S}{S_0} \\ \ln \frac{EI(\theta_2)}{EI_0} = a(\theta_2) \ln \frac{K_{fs}}{K_{fs0}} + b(\theta_2) \ln \frac{\mu_s}{\mu_{s0}} + c(\theta_2) \ln \frac{\rho}{\rho_0} + d(\theta_2) \ln \frac{\phi}{\phi_0} + e(\theta_2) \ln \frac{S}{S_0} \\ \ln \frac{EI(\theta_3)}{EI_0} = a(\theta_3) \ln \frac{K_{fs}}{K_{fs0}} + b(\theta_3) \ln \frac{\mu_s}{\mu_{s0}} + c(\theta_3) \ln \frac{\rho}{\rho_0} + d(\theta_3) \ln \frac{\phi}{\phi_0} + e(\theta_3) \ln \frac{S}{S_0} \\ \ln \frac{EI(\theta_4)}{EI_0} = a(\theta_4) \ln \frac{K_{fs}}{K_{fs0}} + b(\theta_4) \ln \frac{\mu_s}{\mu_{s0}} + c(\theta_4) \ln \frac{\rho}{\rho_0} + d(\theta_4) \ln \frac{\phi}{\phi_0} + e(\theta_4) \ln \frac{S}{S_0} \\ \ln \frac{EI(\theta_5)}{EI_0} = a(\theta_5) \ln \frac{K_{fs}}{K_{fs0}} + b(\theta_5) \ln \frac{\mu_s}{\mu_{s0}} + c(\theta_5) \ln \frac{\rho}{\rho_0} + d(\theta_5) \ln \frac{\phi}{\phi_0} + e(\theta_5) \ln \frac{S}{S_0} \end{cases} \quad (18)$$

综上, 考虑挤喷效应的  $K_{fs}$  流体因子弹性阻抗反演流程如图 4 所示, 通过各角度叠加地震数据和对应的角度子波提取出弹性阻抗数据体。之后通过

尺度匹配后的井曲线与井上弹性阻抗数据进行拟合, 得到适用于工区的系数, 最后通过式(18)反演出工区流体因子数据体, 进行储层流体识别。

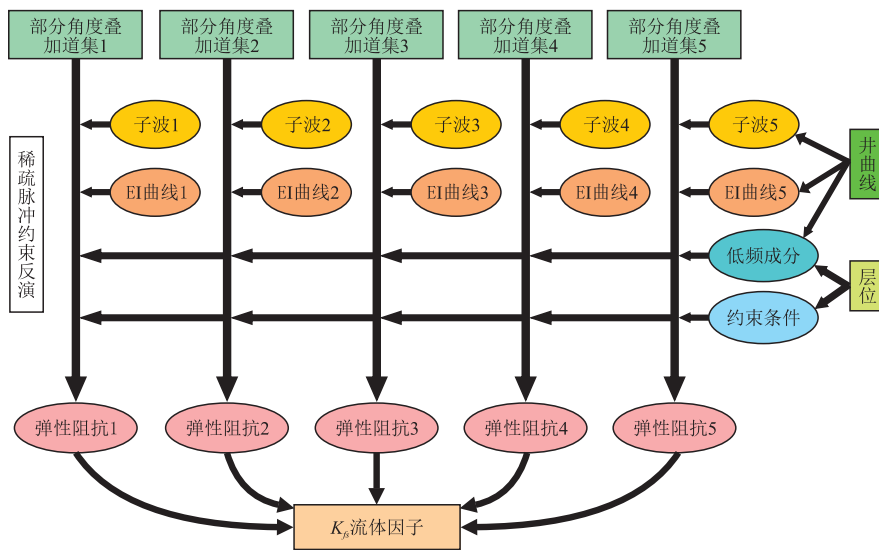


图 4 考虑挤喷效应的  $K_{fs}$  流体因子弹性阻抗反演流程图

Fig. 4  $K_{fs}$  fluid factor elastic impedance inversion flow chart considering the effect of squeezing and spraying

## 2 应用实例

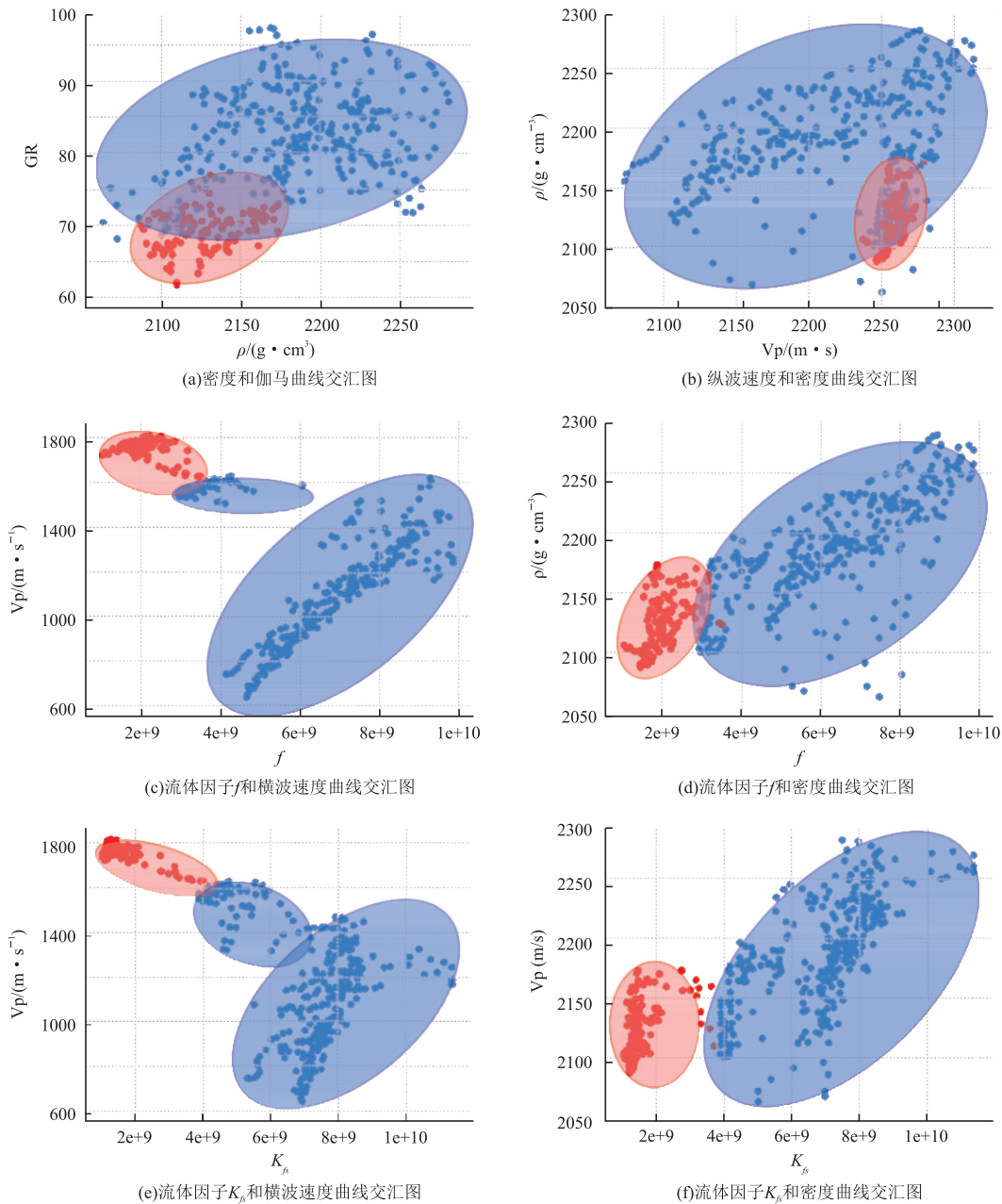
### 2.1 井曲线油气敏感性交汇分析

C工区位于中国渤海湾地区, 目的层约 1 500 m, 以砂和泥为主, 少部分含角砾岩, 岩石基质矿物

主要为石英和粘土。地质资料指出, 工区储层受构造和岩性双重控制, 油气多富集在为三角洲前缘坡移扇和滑塌浊积扇砂体, 多期发育的砂体互相叠置, 互不连通, 横向变化大。测井解释表明, 储层孔隙度在 15%~30%, 裂缝较发育, 当地震波传播时必然伴随显著的挤喷流现

象,因而不考虑流体局部挤喷现象的常规流体因子将存在一定的油气解释误差。为了进一步对比 Russell 流体因子  $f$  和考虑挤喷效应的  $K_{fs}$

流体因子在 C 工区的油气敏感性,研究中分别计算了两种流体因子的井上曲线,并得到图 5 的交汇分析。



图中红色表示井上油层解释结果,蓝色表示井上水层解释结果

图 5 C 工区目的层段井曲线交汇分析图

Fig. 5 Target interval well curve intersection analysis diagram in work area C

从交汇分析图 5(a)和图 5(b)可以看出,常规的  $V_p$ 、 $\rho$ 、GR 等参数不能较好地区分油层和水层。与图 5(c)和 5(d)中的 Russell 流体因子  $f$  相比,考虑挤喷效应后的流体因子  $K_{fs}$ (图 5(e)和图 5(f))具有更强的油水识别能力,在交汇分析中表现出更明显

的油水区分区,证明了在裂隙较发育的 C 工区利用  $K_{fs}$  流体因子指导油气预测和储量评估的有效性。

## 2.2 流体因子反演

理论分析可知,常规 Biot-Gassmann 理论假设孔隙流体有足够的时间流动,且没有波动诱发产生

的孔隙压力梯度,因而基于该理论提出的 Russell 流体因子可能不适用于裂缝发育的 C 工区;而 $K_{fs}$  流体因子考虑了孔裂隙间的挤喷流动,其刻画的 C 工区的储层展布在细节上将会更加可靠。为了证明  $K_{fs}$  流体因子在裂隙发育工区的适用性,在 C 工区

分别开展了 Russell 流体因子叠前弹性阻抗反演和  $K_{fs}$  流体因子叠前弹性阻抗反演。其中,图 6 和图 10 为工区地震剖面,图 7 和图 11 为对应的小角度弹性阻抗剖面,图 8、图 9、图 12、图 13 分别为测线一和测线二的流体因子反演剖面。

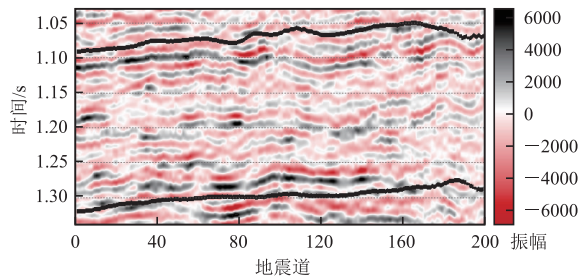


图 6 测线一地震剖面

Fig. 6 Seismic of survey line 1

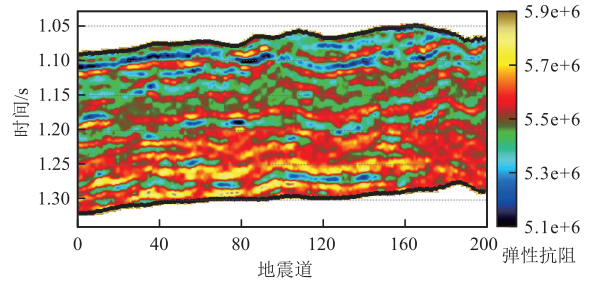


图 7 小角度弹性阻抗反演剖面

Fig. 7 Small angle elastic impedance inversion profile

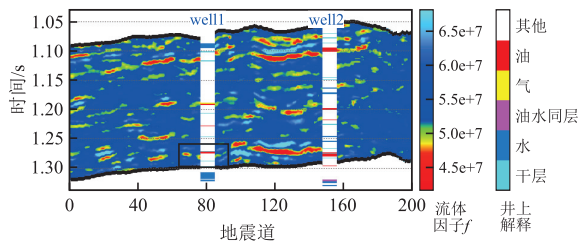


图 8 Russell 流体因子  $f$  剖面

Fig. 8 Russell fluid factor  $f$  profile

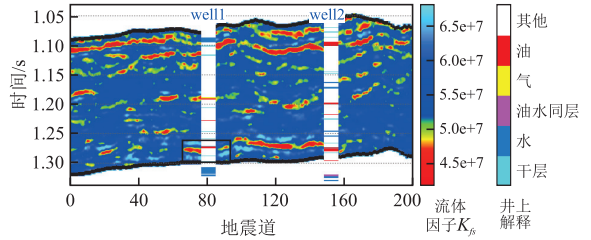


图 9 考虑挤喷效应的流体因子  $K_{fs}$  剖面

Fig. 9 Fluid factor  $K_{fs}$  profile considering BISQ effect

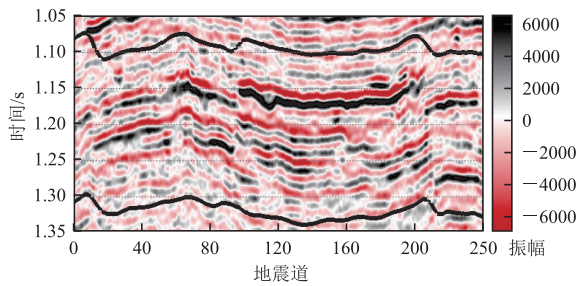


图 10 测线二地震剖面

Fig. 10 Seismic of survey line 2

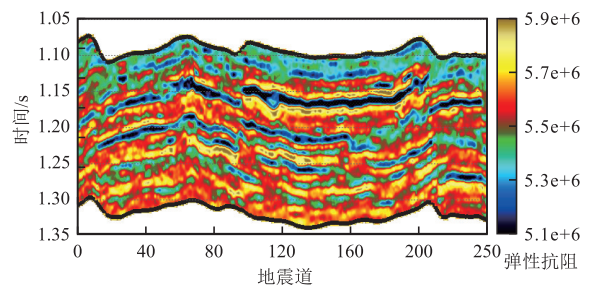


图 11 小角度弹性阻抗反演剖面

Fig. 11 Small angle elastic impedance inversion profile

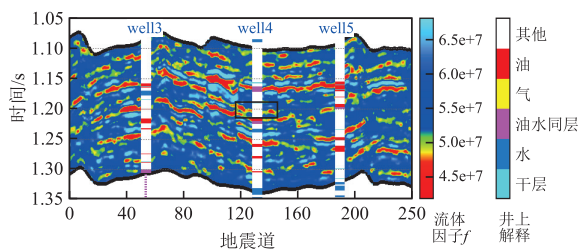


图 12 Russell 流体因子  $f$  剖面

Fig. 12 Russell fluid factor  $f$  profile

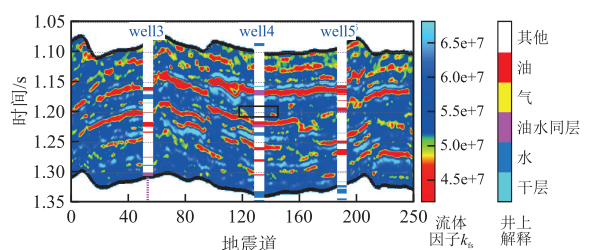


图 13 考虑挤喷效应的流体因子  $K_{fs}$  剖面

Fig. 13 Fluid factor  $K_{fs}$  profile considering BISQ effect

如图 6 至图 13 所示,对比分析两种流体因子的剖面结果,尽管考虑挤喷效应的流体因子  $K_{fs}$  剖面和 Russell 流体因子  $f$  剖面对储层的整体预测趋势是一致的,但  $K_{fs}$  流体因子剖面的横向连续性更好,对储层横向发育和油层展布的刻画更为清晰。此外, $K_{fs}$  流体因子通过补充微观挤喷效应影响,在流体识别方面表现出更高的灵敏度。观察反演结果

中黑色方框所示的区域,Russell 流体因子剖面与井上油气解释不匹配,存在解释误差,而  $K_{fs}$  流体因子剖面较好地识别了薄油层,解释结果和测井解释的吻合度更高,反演结果更可靠。

最后,对得到的两种流体因子制作了储层沿层切片,如图 14 所示,获得了两种流体因子对于储层的平面展布预测的直观对比。

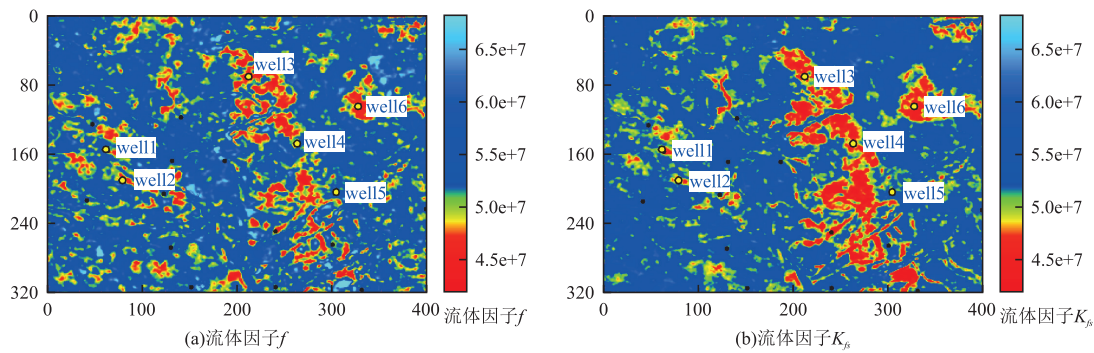


图 14 流体因子  $f$  和  $K_{fs}$  沿层切片对比

Fig. 14 Comparison of fluid factors  $f$  and  $K_{fs}$  along slice

图 14 同时展示了 C 工区该储层段的 6 口油井,对比两种流体因子切片可以看出,两种流体因子都较好地刻画出 C 工区中储层分布,整体预测效果相近。然而,Russell 流体因子切片对于 well1、well4 两口油井的匹配性较差,切片反演吻合率仅 50%,而  $K_{fs}$  流体因子切片改善了 well1 和 well4 的横向预测效果,与工区 6 口油井的反演吻合度达 83%,油层边界更清晰,更好地指示了储层发育形态和空间展布范围。两种方法的工区应用效果表明,考虑挤喷效应的  $K_{fs}$  流体因子叠前地震弹性阻抗反演方法对油气水的识别能力更强,可以为储层的勘探开发提供更可靠的指导。

### 3 结论

相较于 Russell 流体因子, $K_{fs}$  流体因子对地层流体类型具有更高的敏感度,有助于减少孔裂隙间局部挤喷现象产生的流体解释误差。本研究从考虑挤喷效应的  $K_{fs}$  流体因子反射系数方程出发,分析了该反射系数近似式的精度,推导了考虑挤喷效应影响的弹性阻抗方程,并将方法应用于 C 工区,实现了  $K_{fs}$  流体因子弹性阻抗预测。实践表明,与常规流体因子反演相比, $K_{fs}$  流体因子剖面的井上吻合度更高,对薄油层的识别效果更好,可以为裂隙发育的工区提供更可靠的储层预测成果。但必须指出

的是,考虑挤喷效应的  $K_{fs}$  流体因子弹性阻抗反演方法对工区井资料要求较高,反演中参与约束的井曲线需要提前处理计算,因此方法的适用性仍需进一步提高。

### 参考文献:

- [1] SMITH G C, GIDLOW P M. Weighted stacking for rock property estimation and detection of GAS[J]. Geophysical Prospecting, 1987, 35(9): 993—1014.
- [2] FATTI J L, SMITH G C, VAIL P J, et al. Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: A 3—D seismic case history using the Geostack technique [J]. Geophysics, 1994, 59(9): 1362—1376.
- [3] WALLACE R, YOUNG R. Pre-stack Inversion: Evolving the Science of Inversion[J]. CSEG Recorder, 1996, 21(10): 12—23.
- [4] GOODWAY B, CHEN T W, DOWNTON J. Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters; “ $\lambda\rho$ ”, “ $\mu\rho$ ”, & “ $\lambda/\mu$  fluid stack”, from P and S inversions [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 1997. Society of Exploration Geophysicists, 1997: 183—186.
- [5] GOODWAY B. AVO and lame constants for rock parameterization and fluid detection[J]. CSEG Recorder, 2001, 26(6): 39—60.
- [6] HEDLIN K. Pore space modulus and extraction using

- AVO [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2000. Society of Exploration Geophysicists, 2000: 170—173.
- [7] KATAHARA K W. Lamé's parameter as a pore-fluid indicator: A rock-physics perspective [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2001. Society of Exploration Geophysicists, 2001: 326—328.
- [8] RUSSELL B H, HEDLIN K, HILTERMAN F J, et al. Fluid-property discrimination with AVO: A Biot-Gassmann perspective [J]. *Geophysics*, 2003, 68(1): 29.
- [9] RUSSELL B H, GRAY D, HAMPSON D P. Linearized AVO and poroelasticity [J]. *Geophysics*, 2011, 76(3): C19 C19—C29.
- [10] 张世鑫. 基于地震信息的流体识别方法研究与应用 [D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2012.  
ZHANG S X. Research and application of fluid identification method based on seismic information [D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2012. (In Chinese)
- [11] CHEN G, WANG X J, WU B C, et al. Computation of dry-rock  $V_p/V_s$  ratio, fluid property factor, and density estimation from amplitude-variation-with-offset inversion [J]. *Geophysics*, 2018, 83 (6): R669—R679.
- [12] LI S J, GUI J Y, GAO J H, et al. Direct inversion for sensitive elastic parameters of deep reservoirs [J]. *Acta Geophysica*, 2019, 67(5): 1329—1340.
- [13] DVORKIN J. Dynamic poroelasticity: A unified model with the squirt and the Biot mechanisms [J]. *Geophysics*, 1993, 58(4): 524.
- [14] 张玉洁, 刘洪, 崔栋, 等. 基于挤喷流效应的 Russell 流体因子推广及应用 [J]. *地球物理学报*, 2016, 59 (10): 3901—3908.  
ZHANG Y J, LIU H, CUI D, et al. Construction and application of the Russell fluid factor with squirt flow effect [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59 (10): 3901—3908. (In Chinese)
- [15] WANG Y R, ZONG Z Y, YIN X Y. Fluid discrimination incorporating amplitude variation with angle inversion and squirt flow of the fluid [J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(4): 1592—1604.
- [16] CONNOLLY P. Elastic impedance [J]. *The Leading Edge*, 1999, 18(4): 438—452.
- [17] CAMBOIS G. AVO inversion and elastic impedance [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2000. Society of Exploration Geophysicists, 2000, 19: 2484—2502.
- [18] VERWEST B, MASTERS R, SENA A. Elastic impedance inversion [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2000. Society of Exploration Geophysicists, 2000, 19: 1580—1582.
- [19] WHITCOMBE D N, CONNOLLY P A, REAGAN R L, et al. Extended elastic impedance for fluid and lithology prediction [J]. *Geophysics*, 2002, 67(1): 63—67.
- [20] 马劲风. 地震勘探中广义弹性阻抗的正反演 [J]. *地球物理学报*, 2003, 46(1): 118—124.  
MA J F. Forward modeling and inversion method of generalized elastic impedance in seismic exploration [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(1): 118—124. (In Chinese)
- [21] 王保丽, 印兴耀, 张繁昌. 基于 Gray 近似的弹性波阻抗方程及反演 [J]. *石油地球物理勘探*, 2007, 42(4): 435—439.  
WANG B L, YIN X Y, ZHANG F C. Gray approximation-based elastic wave impedance equation and inversion [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2007, 42 (4): 435—439. (In Chinese)
- [22] 印兴耀, 张世鑫, 张繁昌, 等. 利用基于 Russell 近似的弹性波阻抗反演进行储层描述和流体识别 [J]. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(3): 373—380.  
YIN X Y, ZHANG S X, ZHANG F C, et al. Utilizing Russell Approximation-based elastic wave impedance inversion to conduct reservoir description and fluid identification [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2010, 45(3): 373—380. (In Chinese)
- [23] 宗兆云, 印兴耀, 吴国忱. 基于叠前地震纵横波模量直接反演的流体检测方法 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55(1): 284—292.  
ZONG Z Y, YIN X Y, WU G C. Fluid identification method based on compressional and shear modulus direct inversion [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(1): 284—292. (In Chinese)
- [24] CHEN H Z, LI J X, INNANEN K A. Nonlinear inversion of seismic amplitude variation with offset for an effective stress parameter [J]. *Geophysics*, 2020, 85(4): R299—R311.
- [25] THOMSEN L. Biot-consistent elastic moduli of porous rocks: Low-frequency limit [J]. *Geophysics*, 1985, 50(12): 2797—2807.
- [26] 陈颢. 地壳岩石的力学性能: 理论基础与实验方法: 固体地球物理进展丛书 [M]. 北京: 地震出版社, 1988.  
CHEN Y. Mechanical properties of crustal rocks: Theoretical basis and experimental methods; Series of solid geophysics progress [M]. Beijing: Seismological

- Press, 1988. (In Chinese)
- [27] 唐晓明. 含孔隙、裂隙介质弹性波动的统一理论: Biot 理论的推广[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(6): 784—795.  
TANG X M. Unified theory of elastic wave in porous and fractured media-Extension of-Biot theory[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2011, 41(6): 784—795. (In Chinese)
- [28] ZONG Z Y, YIN X Y, WU G C. Geofluid discrimination incorporating poroelasticity and seismic reflection inversion[J]. Surveys in Geophysics, 2015, 36(5): 659—681.

## The method and application of elastic impedance inversion for fluid factor with the consideration of squirt flow—taking a fractured reservoir in Bohai Bay as an example

QU Xiaoyang<sup>1</sup>, QU Yuzheng<sup>2</sup>, WEI Meng<sup>1</sup>

(1. Sinopec Chongqing shale gas Co. LTD, Chongqing 408400, China;

2. Taizhou Youheng oil and gas Engineering Service Co., LTD, Taizhou 225300, China)

**Abstract:** Fluid factor is essential for identifying pore fluid and determining the spatial distribution of oil and gas reservoirs. With the development of geophysical exploration in the direction of complexity and refinement, the challenge of reservoir interpretation is increasing rapidly. The microporous medium theory points out that a large number of pores and fractures with uneven mechanical properties are developed in underground rocks. When seismic waves propagate, the fluid in soft fractures will be squeezed into adjacent hard pores, resulting in the extrusion and spray phenomenon, which influences fluid flow and rock force. Based on Biot's theory established by the Russell fluid factor, the characterization of pore fluid flow is insufficient, which may lead to specific hydrocarbon interpretation errors. Therefore, in recent years, a fluid factor has been developed to take into account the extrusion effect, which improves the reliability of thin-layer fluid identification. In this study, the AVO characteristics of the fluid factor  $K_{fs}$  reflection equation considering the effect of squeezing and spraying were verified, and the direct inversion method of fluid factor  $K_{fs}$  elastic impedance was proposed according to the inversion idea of elastic impedance, which improved the stability of fluid factor  $K_{fs}$  prediction and provided a new idea for the identification of pre-stack seismic fluid.

**Keywords:** fluid factor; squirt flow; elastic impedance inversion