

文章编号: 1001-1749(2024)04-0377-09

# 基于各向异性理论的地应力地震预测技术研究

许凯<sup>1,2</sup>, 张广智<sup>1</sup>, 孙振涛<sup>1,2</sup>, 王世星<sup>2</sup>, 苏凌<sup>2</sup>, 杨骞<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580;

2. 中石化石油物探技术研究院有限公司, 南京 211103)

**摘要:** 随着非常规油气勘探和开发技术的发展, 尤其是页岩油气高效开发的需要, 地应力的准确预测对页岩油气水平井轨迹设计和有利压裂区域的选取十分重要。笔者以各向异性等效介质理论为基础, 以页岩各向异性岩石物理模型为驱动, 基于宽方位地震数据开展高精度的叠前 AVAZ 反演, 获得弹性参数及裂缝岩石物理参数, 并结合地应力预测模型, 实现地应力大小及方向的定量预测。通过理论模型测试与实际资料应用显示, 该方法预测的地应力具有较高的精度, 符合地质规律, 且与微地震压裂监测结果及测井解释结果具有良好的一致性, 有效指导了页岩油气水平井轨迹设计及压裂方案部署。

**关键词:** 页岩油气; 地应力; 各向异性; AVAZ 反演; 水平应力差异系数; 应力方向

**中图分类号:** P631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.04.01

## 0 引言

随着非常规油气勘探开发的不断深入, 页岩油气作为一种天然的非常规能源, 正逐步成为油气勘探开发的热点。涪陵、威荣、复兴等大型页岩油气田的发现揭示我国页岩油气资源丰富, 具有广阔的勘探开发前景<sup>[1]</sup>。页岩油气自生自储于页岩中<sup>[2]</sup>, 其基质具有低渗透性、低孔隙度的特点, 裂缝网络的形成成为获得工业油气流的关键, 开发过程中需要进行大规模水力压裂, 而准确的地应力预测是优化水力压裂设计的前提条件<sup>[3]</sup>, 因此, 开展地应力预测方法研究具有十分重要的意义。

国内外学者针对地应力测量及预测开展了大量研究工作。20 世纪初, Lieurance<sup>[4]</sup> 基于应力解除法开展了岩石应力的测量, 首次实现岩石地应力的直

接测量。Haimson<sup>[5]</sup> 利用水力压裂法进行了地应力测量, 该方法精度较高, 并得到了较为广泛的应用。黄荣樽<sup>[6]</sup> 引入构造应力的新概念, 并提出黄氏模型进行地应力的计算, 但该模型并未考虑地层岩性对应力的影响, 且仅适用于构造简单区域。Iverson<sup>[7]</sup> 假设地下岩层初始状态下的水平方向是受到限制的, 也就是初始状态下水平方向的应变为零, 同时符合弹性应变假设, 通过反演获得岩石的弹性信息, 进一步即可得到地应力场。刘允芳等<sup>[8]</sup> 通过建立拟合函数进行构造应力计算, 实现了区域性的地应力场预测。Sayers<sup>[9]</sup> 基于均匀各向同性介质理论实现了页岩地应力预测, 而页岩储层具有较强的非均质性和各向异性特征, 因此, 应力预测存在一定误差。Gray and Anderson<sup>[10]</sup> 认为在裂缝存在区域, 应变是连续变化的, 然而水平主应力可能会因为岩石弹性参数的变化而发生突变, 因此研发形成了基于应

收稿日期: 2023-03-13

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U19B6003); 中国石化十条龙课题(P21078-4); 中国石化科技攻关项目(P22081, P22386)

第一作者: 许凯(1988-), 男, 在读博士, 主要从事地震储层预测与非常规地球物理一体化工作, E-mail: xukai\_swty@sinopec.com。

变理论求取地应力的方法。邓金银<sup>[11]</sup>基于页岩的横向各向同性特征,构建了地应力计算模型,但其所使用的弹性参数较多,无法利用常规测井等资料直接计算,制约了该思路方法的推广应用。张广智等<sup>[12]</sup>提出了适用于页岩地层的岩石物理等效模型的建立流程,并以此为基础实现了最小水平地应力的有效预测。袁萌<sup>[13]</sup>将叠前反演与传统应力模型计算方法相结合,基于机器学习中的支持向量机算法实现现今地应力场的合理、准确预测。

笔者依据页岩储层的地质特征,基于各向异性介质等效理论,首先构建页岩岩石物理等效模型,以构建的页岩岩石物理模型为驱动,基于宽方位叠前地震数据开展叠前 AVAZ 反演,获得弹性参数和裂缝岩石物理参数,并结合构建的地应力预测模型,实现地应力大小及方向的准确预测。通过理论模型和实际资料的测试及应用,并结合微地震压裂监测结果及测井解释结果,验证了该方法的正确性和有效性,且地应力预测结果能够有效指导页岩油气水平井轨迹设计及压裂方案部署。

## 1 技术方法

聚焦现今地应力场地震预测科学问题,笔者以页岩各向异性岩石物理模型为驱动,基于宽方位叠前地震数据开展叠前 AVAZ 多参数反演,获得弹性参数及裂缝岩石物理参数,并结合构建的地应力预测模型,实现地应力大小及方向的准确预测。

### 1.1 页岩气各向异性岩石物理模型构建

构建合理、正确的页岩岩石物理模型,能够搭建岩石物性参数与弹性参数、工程参数的桥梁。通过岩石物理建模,可获得弹性参数及裂缝岩石物理参数,同时可为后续叠前 AVAZ 反演的低频模型建立提供基础数据。

页岩矿物组分复杂,孔隙流体多样,且广泛存在各向异性特征。页岩中主要含有黏土、石英、方解石等矿物,其中黏土颗粒呈定向排列,富含有机质,且孔隙度、渗透率较低。根据页岩实际地质特征,进行岩石物理建模。建模的整体思想是:在构建 VTI (水平横向各向同性)背景介质弹性矩阵的基础上,通过植入孔隙构建“干”岩石骨架,进一步植入高角度裂缝,并根据各向异性流体替换方法,估算得到饱和流体的岩石弹性参数及各向异性参数,结合裂缝岩石物理模型,则可得到裂缝岩石物理参数。模型构建流程为:

1) 基于 Vogit-Reuss-Hill 平均理论计算不同类型岩石矿物的等效模量和孔隙流体模量;

2) 基于微分等效介质理论 (DEM) 将孔隙植入基质矿物,计算干燥岩石骨架的体积模量和剪切模量;

3) 基于 Backus 平均理论<sup>[14]</sup>构建 VTI 互层状背景介质弹性矩阵;

4) 基于 Schoenberg<sup>[15]</sup>线性滑动理论,植入高角度裂缝;

5) 通过 Brown-Korringtona 各向异性流体替换理论植入流体,计算出饱和流体的岩石体积模量和剪切模量;

6) 根据上述步骤计算获得饱和流体的岩石柔度矩阵,求逆则可得到饱和流体的岩石刚度矩阵;

7) 根据 Schoenberg 线性滑动理论和 Hudson 模型,结合 Thomsen 弱各向异性理论假设,计算获得弹性参数、Thomsen 各向异性参数和裂缝岩石物理参数。

### 1.2 基于各向异性理论的叠前 AVAZ 反演方法

考虑到方位叠前地震数据中蕴藏着与裂缝储层密切相关的振幅信息,开展基于各向异性理论的叠前 AVAZ 反演,可获得弹性参数与裂缝岩石物理参数,为后续地应力地震预测提供基础数据。首先基于 HTI (垂向各向同性) 介质假设的 AVAZ 公式,开展公式近似,以获得满足精度要求的叠前 AVAZ 反演简化公式,基于贝叶斯反演理论开展叠前 AVAZ 多参数反演,以获得稳定可靠的弹性参数与裂缝岩石物理参数。

#### 1.2.1 叠前 AVAZ 反演公式近似

HTI 对称介质存在五个独立的弹性刚度分量,其  $6 \times 6$  的弹性刚度矩阵  $C_{HTI}$  可以表示为:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{22} - 2C_{44} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} - 2C_{44} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $C_{11}, C_{12}, C_{22}, C_{44}, C_{55}$  分别为弹性刚度分量。

在 HTI 等效介质的弱各向异性假设下, Thomsen 简化了上述复杂关系式,定义了五个弹性常数:

$$\alpha = \sqrt{C_{33}/\rho}, \beta = \sqrt{C_{44}/\rho} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \epsilon^{<V>} &= \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}} \\ \delta^{<V>} &= \frac{(C_{13} + C_{55})^2 - (C_{33} - C_{55})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{55})} \\ \gamma &= \frac{C_{66} - C_{44}}{2C_{44}} \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $\alpha, \beta$  和  $\rho$  分别为各向同性背景部分的纵、横波速度和密度,  $\epsilon^{<V>}, \delta^{<V>}$  及  $\gamma$  为弱各向异性参数, 也称为 Thomsen 各向异性参数。根据弱各向异性近似假设条件, Rüger<sup>[16]</sup> 推导了 HTI 等效介质纵波反射系数近似方程, 具体形式如下:

$$\begin{aligned} R_{PP}(\theta, \phi) &\approx \frac{1}{2} \frac{\Delta Z}{Z} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta \alpha}{\alpha} - \left( \frac{2\beta}{\alpha} \right)^2 \frac{\Delta G}{G} + \right. \\ &\left. \left[ \Delta \delta^{<V>} + 2 \left( \frac{2\beta}{\alpha} \right)^2 \Delta \gamma \right] \cos^2 \phi \right\} \\ \sin^2 \theta + \frac{1}{2} &\left\{ \frac{\Delta \alpha}{\alpha} + \Delta \epsilon^{<V>} \cos^4 \phi + \right. \\ &\left. \Delta \delta^{<V>} \sin^2 \phi \cos^2 \phi \right\} \sin^2 \theta \tan^2 \theta \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $\alpha$  为各向同性背景部分的纵波速度,  $\beta$  为各向同性背景部分的横波速度,  $\rho$  为密度,  $G = \rho\beta^2$ 。  $Z = \rho\alpha$ , 代表纵波阻抗。  $\theta$  为入射角,  $\phi$  为方位角,  $\Delta\alpha/\alpha$  为上下两层介质的各向同性背景部分纵波速度差与纵波速度平均的比值,  $\Delta\epsilon^{<V>}, \Delta\delta^{<V>}$  和  $\Delta\gamma$  为上下两层介质 Thomsen 弱各向异性参数的差值。

根据扰动理论与弱各向异性近似理论, 基于弱各向异性介质假设的 Ruger 反射系数近似公式可表示为各向同性背景部分和各向异性扰动部分, 当入射角小于  $30^\circ$  时, 舍掉  $\sin^2 \theta \tan^2 \theta$  项以及密度项, 并结合 Fatti 近似, 获得如下具有纵波阻抗、横波阻抗的反射系数公式:

$$\begin{aligned} R_{PP}(\theta, \phi) &= R_{PP}^{iso} + R_{PP}^{ani} \\ &\approx \frac{1}{2} \sec^2 \theta \frac{\Delta I_P}{I_P} - 4g \sin^2 \theta \frac{\Delta I_S}{I_S} \\ &+ \frac{1}{2} \left[ \Delta \delta^{<V>} + 2 \left( \frac{2\beta}{\alpha} \right)^2 \Delta \gamma \right] \cos^2 \phi \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $\frac{\Delta I_P}{I_P}$  为上下两层介质各向同性背景部分的纵

波阻抗差与纵波阻抗平均的比值,  $\frac{\Delta I_S}{I_S}$  为上下两层

介质各向同性背景部分的横波阻抗差与横波阻抗平均的比值。

进一步根据 Schoenberg 线性滑动模型和 Hudson 薄币状裂隙模型的关系, 得到 Thomsen 参数  $\epsilon^{<V>}, \delta^{<V>}$  和  $\gamma$  与线性滑动模型所表征裂缝岩石物理参数  $\Delta_N$  和  $\Delta_T$  之间的关系。

$$\epsilon^{<V>} = -2g(1-g)\Delta_N \quad (6)$$

$$\delta^{<V>} = -2g[(1-2g)\Delta_N + \Delta_T] \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{\Delta_T}{2} \quad (8)$$

将公式(7)、(8)代入到公式(5)中, 通过整理得到:

$$\begin{aligned} R_{PP}(\theta, \phi) &= R_{PP}^{iso} + R_{PP}^{ani} \\ &\approx \frac{1}{2} \sec^2 \theta \frac{\Delta I_P}{I_P} - 4g \sin^2 \theta \frac{\Delta I_S}{I_S} \\ &- (g \cos^2 \phi \sin^2 \theta) (1-2g) R_{\Delta_N} + (g \cos^2 \phi \sin^2 \theta) R_{\Delta_T} \end{aligned} \quad (9)$$

根据 Ruger 公式推导的假设条件: 上下两层介质的弹性参数变化不大, 且上层为各向同性弹性介质, 则  $\Delta_{N1} = 0, \Delta_{T1} = 0$ , 因此,  $R_{\Delta_N} = \Delta_N, R_{\Delta_T} = \Delta_T$ , 基于公式(9)改写的最终反演公式为:

$$\begin{aligned} R_{PP}(\theta, \phi) &= \sec^2 \theta R_P - 8g \sin^2 \theta R_S - \\ &(g \cos^2 \phi \sin^2 \theta) (1-2g) \Delta_N + (g \cos^2 \phi \sin^2 \theta) \Delta_T \end{aligned} \quad (10)$$

$R_P$  为纵波阻抗反射系数,  $R_S$  为横波阻抗反射系数,  $\Delta_N$  为裂缝法向弱度,  $\Delta_T$  为裂缝切向弱度, 其中  $\Delta_N, \Delta_T$  为通过页岩岩石物理建模获得的裂缝参数。

设计两层反射系数模型(表 1), 对比近似公式与精确公式的纵波反射系数(图 1), 反射系数误差计算公式为:

表 1 裂缝型储层数值模型

Tab. 1 The numerical model of fractured reservoir

两层模型	纵波速度 (m/s)	横波速度 (m/s)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta_N$	$\Delta_T$
1	4 000	2 200	2 680	0	0
2	3 500	2 000	2 540	0.04	0.18

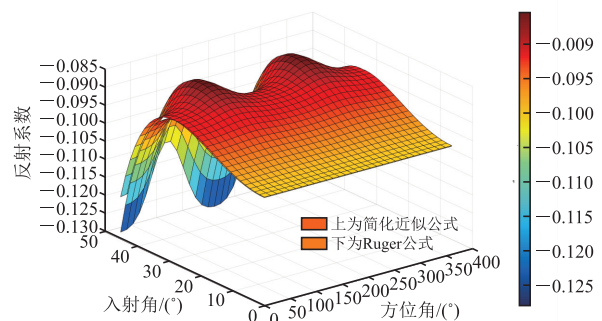


图 1 简化近似公式与 Ruger 公式的三维反射系数对比  
Fig. 1 The 3D reflection coefficient comparison of simplified approximate formula and Ruger formula

$$error = \frac{|R_{Ruger} - R_{近似}|}{R_{Ruger}}, \text{在入射角达到 } 30^\circ$$

时(图 2),反射系数计算误差达 2.78%,可得近似公式的精度完全满足反演要求。

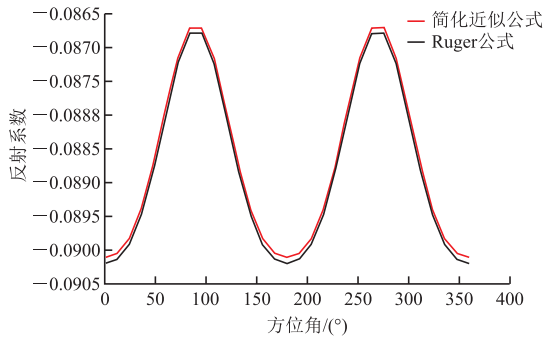


图 2 简化近似公式与 Ruger 公式在入射角为  $30^\circ$  处的反射系数对比

Fig. 2 Comparison of reflection coefficients between simplified approximation formula and ruger formula at an incident angle of  $30^\circ$

### 1.2.2 基于贝叶斯理论的叠前 AVAZ 反演

基于公式(10),通过叠前 AVAZ 反演可获得纵波阻抗、横波阻抗、裂缝法向弱度及裂缝切向弱度参数。根据基于褶积理论,地震振幅响应可表示为如下矩阵形式:

$$d = G \cdot m \quad (11)$$

其中,  $d$  为观测数据,  $G$  为正演算子,  $m$  为模型向量。

假设地震资料背景噪声服从高斯分布,地震数据和反射系数之间的关系通过 Cauchy 分布的似然函数来表示,通过加入柯西约束及模型约束的信息,来提高反演的稳定性与准确性,通过求解构建的反演目标函数则可获得待反演的四个参数,目标函数的具体形式为:

$$\min J(\underline{r}') = J_G(\underline{r}') + J_{Cauchy}(\underline{r}') + J_p(\underline{r}'_{I_p}) + J_s(\underline{r}'_{I_s}) + J_d(\underline{r}'_{\Delta_N}) + J_d(\underline{r}'_{\Delta_T}) \quad (12)$$

其中,第一项描述实际地震道集与模型生成的地震道集间的拟合程度,第二项用来描述约束解的稀疏程度,后面的四项是模型约束项用来控制加入的低频成分。对目标函数求导数可获得最终的反演方程,即其贝叶斯解的形式为:

$$(\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \mu \mathbf{Q} + \mathbf{P}_3) \mathbf{m} = (\mathbf{G}^T \mathbf{d} + \mathbf{Q}_3) \quad (13)$$

其中:

$$\mathbf{P}_3 = \alpha_E \mathbf{C}^T \mathbf{C}' + \alpha_v \mathbf{C}^T \mathbf{C}' + \alpha_\rho \mathbf{C}^T \mathbf{C}' + \alpha_{\Delta_N} \mathbf{C}^T \mathbf{C}' + \alpha_{\Delta_T} \mathbf{C}^T \mathbf{C}' \mathbf{Q}_3 = \alpha_E \mathbf{C}^T \underline{\xi}_E + \alpha_v \mathbf{C}^T \underline{\xi}_v + \alpha_\rho \mathbf{C}^T \underline{\xi}_\rho + \alpha_{\Delta_N} \mathbf{C}^T$$

$$\underline{\xi}_{\Delta_N} + \alpha_{\Delta_T} \mathbf{C}^T \underline{\xi}_{\Delta_T} \quad (14)$$

$\mathbf{Q}$  为加权矩阵,具体形式定义为:

$$\mathbf{Q}_m = \begin{cases} \frac{1}{\left(\frac{r_n^2}{2\sigma_1^2} + 1.0\right)^2}, n \leq N \\ \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \frac{1}{\left(\frac{r_n^2}{2\sigma_2^2} + 1.0\right)^2}, N < n \leq 2N \\ \frac{\sigma_1^2}{\sigma_3^2} \frac{1}{\left(\frac{r_n^2}{2\sigma_3^2} + 1.0\right)^2}, 2N < n \leq 3N \\ \frac{\sigma_1^2}{\sigma_4^2} \frac{1}{\left(\frac{r_n^2}{2\sigma_4^2} + 1.0\right)^2}, 3N < n \leq 4N \end{cases} \quad (15)$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \text{是下三角求和矩阵, } \alpha_{I_p},$$

$\alpha_{I_s}, \alpha_{\Delta_N}, \alpha_{\Delta_T}$  为四个参数对应的系数项,  $\underline{\xi}_{I_p}, \underline{\xi}_{I_s},$

$\underline{\xi}_{\Delta_N}, \underline{\xi}_{\Delta_T}$  为初始模型的反射系数,式中  $\theta = \frac{2\sigma_n^2}{\sigma_m^2}$ ,  $\sigma_n^2$  为噪声方差,  $\sigma_m^2$  为模型反射系数的方差。

### 1.2.3 地应力预测方法

地应力大小及方向的准确预测对于水平井轨迹设计和有利压裂区域的选取具有十分重要的意义。本文以 Gray<sup>[17]</sup> (2011) 提出的地应力理论及计算公式为基础,首先开展地应力大小的计算。最大、最小水平主应力的计算公式为:

$$\sigma_h = \sigma_v \frac{\nu(1+\nu)}{1+EZ_N - \nu^2} \quad (16)$$

$$\sigma_H = \sigma_v \nu \frac{1+EZ_N + \nu}{1+EZ_N - \nu^2} \quad (17)$$

其中,  $E$  为杨氏模量,  $\nu$  为泊松比,  $\sigma_v$  为上覆岩层压力,  $Z_N, Z_T$  分别为垂直裂缝面和平行裂缝面的裂缝柔度系数。

研究表明,最大与最小水平主应力差的比值(DHSR, Differential Horizontal Stress Ratio)是评价储层是否有利于压裂开发的重要指示参数。即 DHSR 值越小,水力压裂越易形成复杂网状缝, DHSR 值越大,水力压裂易形成单一缝。DHSR 的计算如公式(18)所示:

$$DHSR = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{\sigma_H} = \frac{EZ_N}{1+EZ_N + \nu} \quad (18)$$

根据 Schoenberg 线性滑动模型中裂缝柔度  $Z_N$  和  $Z_T$  与裂缝岩石物理参数  $\Delta_N$  和  $\Delta_T$  之间的关系式:

$$Z_N = \frac{\Delta_N}{\rho\alpha^2(1-\Delta_N)} \quad (19)$$

$$Z_T = \frac{\Delta_T}{\rho\beta^2(1-\Delta_T)} \quad (20)$$

结合上述公式推导,则可获得 DHSR 大小的计算表达式为:

$$DHSR = \frac{2I_s^2 \Delta_N}{I_p^2(1-\Delta_N) + 2I_s^2 \Delta_N} \quad (21)$$

其中: $I_P$ 、 $I_S$  分别为纵波阻抗、横波阻抗, $\Delta_N$ 、 $\Delta_T$  分别为裂缝法向弱度、裂缝切向弱度。

结合前述叠前 AVAZ 反演获得的纵横波阻抗、裂缝法向弱度及裂缝切向弱度结果,则可实现地应力的准确计算。

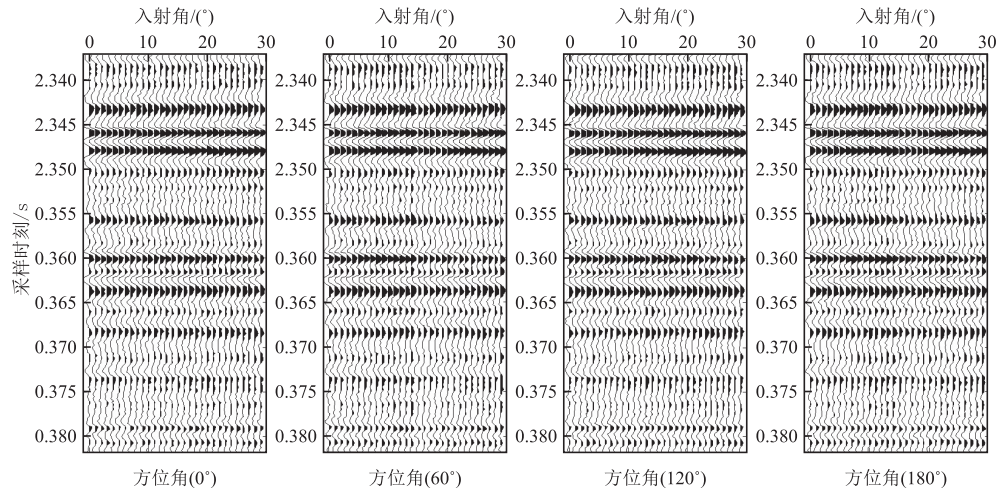
针对地应力方向预测难题,这里基于宽方位地震数据,通过最小二乘椭圆拟合算法,结合偶极声波测井解释的最小主应力方向,则可获得较为准确的

最小主应力方向。

## 2 实例应用

### 2.1 合成数据算例

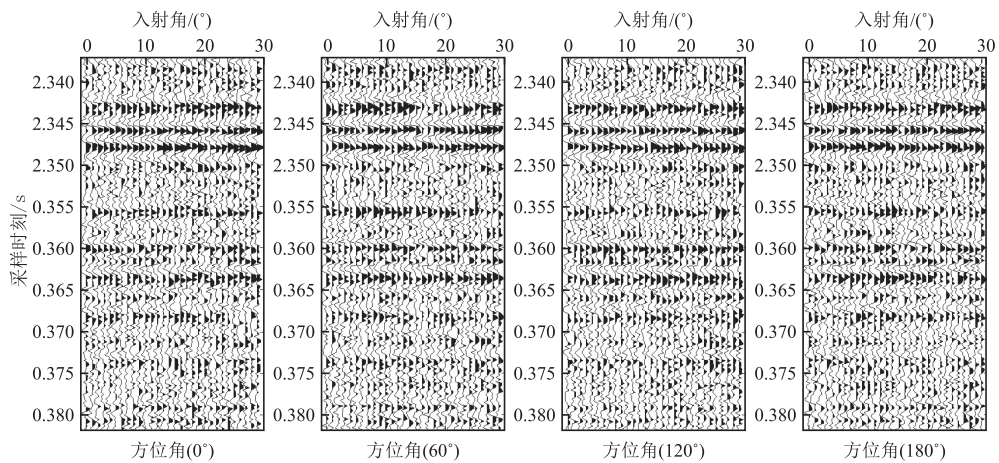
选取实际测井数据,依照岩石物理建模流程计算出裂缝岩石物理参数,采用 40 Hz 雷克子波,利用褶积模型公式合成不同方位的叠前道集,并添加信噪比为 4 和信噪比为 1 的随机噪声,开展基于纵横波阻抗和裂缝岩石物理参数的叠前 AVAZ 反演方法测试。图 3 和图 4 为合成的不同方位叠前地震角度道集,其中图 3 为添加了信噪比为 4 随机噪声的叠前方位地震道集,图 4 为添加了信噪比为 1 随机噪声的叠前方位地震道集。图 5 和图 6 为基于不同信噪比合成道集开展叠前 AVAZ 地震反演,获得纵横波阻抗和裂缝岩石物理参数的反演结果。



方位角为  $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $180^\circ$ ,入射角为  $0\sim 30^\circ$ ,间隔为  $1^\circ$

图 3 信噪比为 4 的方位叠前地震道集

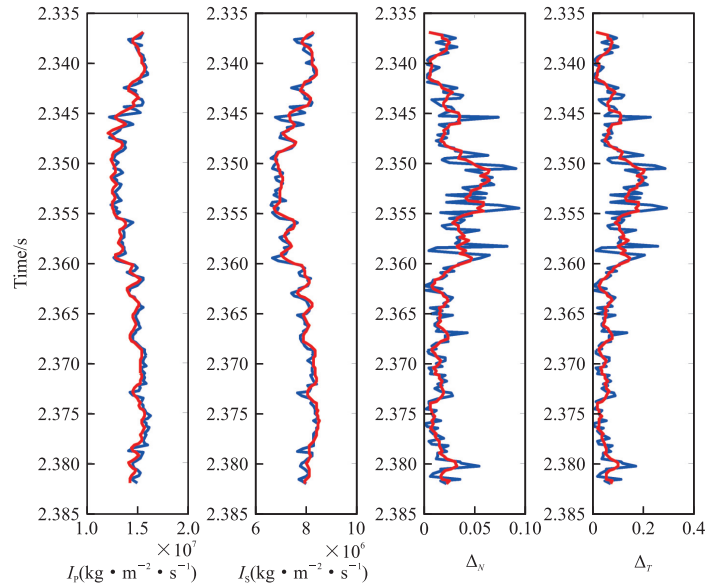
Fig. 3 The SNR of azimuthal pre-stack seismic gathers is 4



方位角为  $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $180^\circ$ ,入射角为  $0\sim 30^\circ$ ,间隔为  $1^\circ$

图 4 信噪比为 1 的方位叠前地震道集

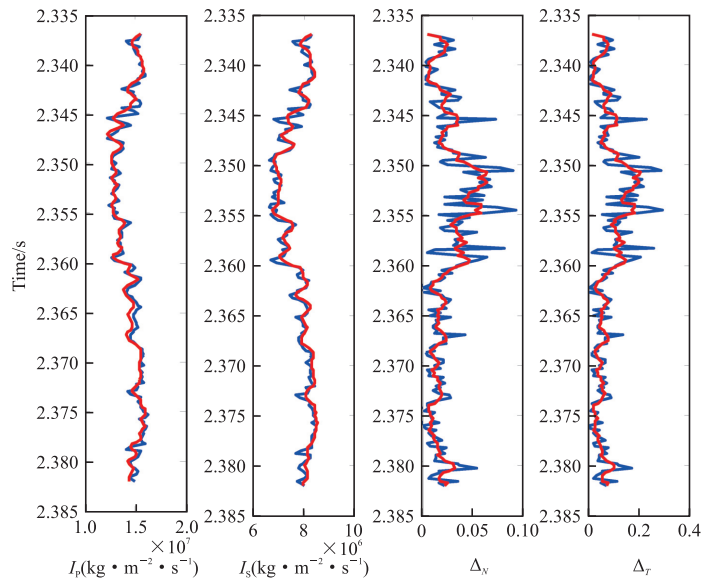
Fig. 4 The SNR of azimuthal pre-stack seismic gathers is 1



从左往右分别为:纵波阻抗、横波阻抗、 $\Delta_N$  和  $\Delta_T$ ,其中红线为真实值,蓝线为反演值

图 5 信噪比为 4 的叠前 AVAZ 反演结果

Fig. 5 The results of re-stack AVAZ inversion that SNR is 4



从左往右分别为:纵波阻抗、横波阻抗、 $\Delta_N$  和  $\Delta_T$ ,其中红线为真实值,蓝线为反演值

图 6 信噪比为 1 的叠前 AVAZ 反演结果

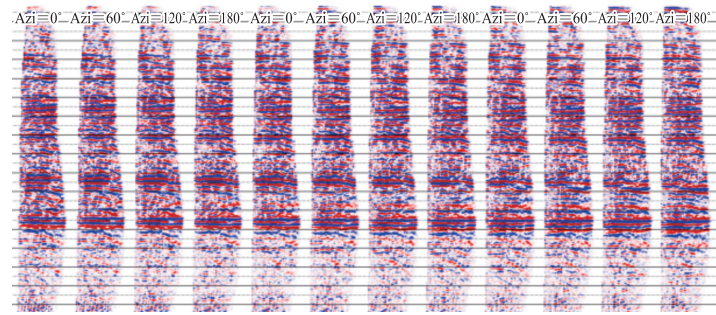
Fig. 6 The results of re-stack AVAZ inversion that SNR is 1

从图 5 和图 6 中反演值与真实值的对比可以看出,在不同信噪比的合成地震数据上开展叠前 AVAZ 反演,获得反演结果整体趋势与真实值较一致,且局部细节吻合较好,即使利用信噪比为 1 的合成地震数据进行方法测试,仍能获得较好的反演估计值,说明了该方法具有一定的抗噪性和稳定性,为后续地应力定量地震预测奠定了良好的数据基础,同时验证了叠前 AVAZ 反演方法在复杂储层预测

方面具备有效性。

### 2.2 实际资料应用

以四川盆地陆相页岩油气储层为研究目标,开展地应力定量地震预测方法测试及应用。该工区的地震数据为宽方位采集,具有较高的横纵比,经地震数据处理后获得叠前方位角度道集振幅能量分布较均匀且品质较高(图 7),满足叠前 AVAZ 反演对地震数据的要求。



方位角度为:0°、60°、120°、180°,入射角范围为:1~35°,每隔 1°为 1 个入射角

图 7 工区连续的叠前方位角度道集

Fig. 7 The continuous pre-stack azimuth angle gathers in the work area

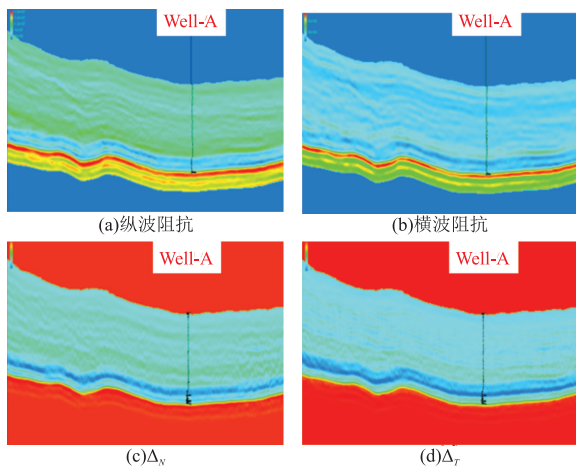


图 8 过 Well-A 井的叠前 AVAZ 反演剖面

Fig. 8 The AVAZ inversion profiles along Well-A, these include: P-wave impedance, S-wave impedance,  $\Delta_N$ ,  $\Delta_T$

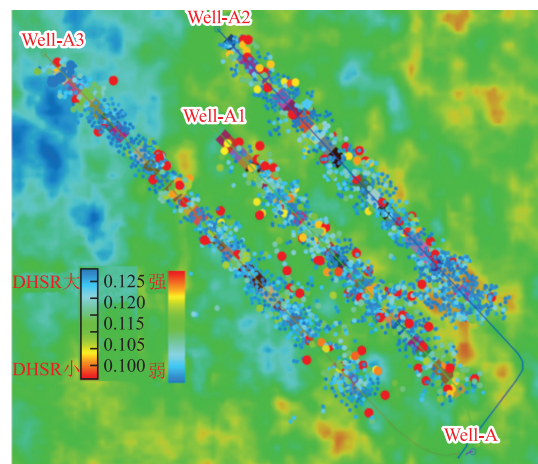


图 9 Well-A 平台 DHSR 预测结果与微地震压裂监测事件叠合显示图

Fig. 9 The overlay slice of well-A platform that includes DHSR magnitude index and micro-seismic event

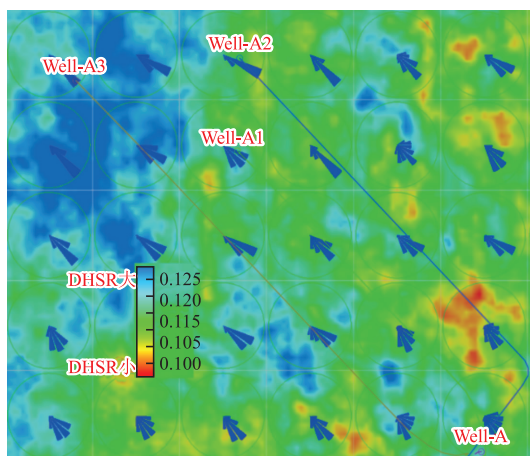


图 10 Well-A 平台 DHSR 大小与最小水平主应力方向预测(玫瑰统计图)叠合显示图

Fig. 10 The overlay slice of well-A platform that includes DHSR magnitude index and minimum horizontal principal stress direction

首先基于测井岩石物理建模获得表征储层弹性特征和裂缝岩石物理特征的数据,进一步开展叠前 AVAZ 反演,获得纵波阻抗、横波阻抗、 $\Delta_N$  和  $\Delta_T$ ,反演结果与井吻合度高且符合地质认识(图 8)。

以叠前 AVAZ 反演结果为输入数据,进一步结合地应力定量预测模型,获得水平应力差异系数(DHSR)及最小水平主应力方向的三维数据体。以 Well-A 平台区域为重点研究范围,该区域共有 3 口水平井开展水力压裂,同时开展了地面微地震压裂监测。

图 9 中的 DHSR 预测结果与微地震压裂监测结果叠合显示,该平台的 DHSR 预测值整体介于 0.1~0.125 之间,属于较好压裂的页岩地层,整体压裂效果相对较均匀,局部应力预测异常与微地震事件分布异常也相对较一致,验证了地应力大小预测结果的有效性与正确性。图 10 表示 DHSR 大小

与最小主应力方向的预测结果,结合图 11 的 Well-A3 井第 29 段的微地震人工裂缝解释结果,基于偶极声波测井计算获得最大主应力方向,说明了这里

计算获得最小主应力方向的合理性和正确性。总体来讲,通过地震预测获得的地应力大小及方向,能够较好地指导水平井轨迹的最优设计。

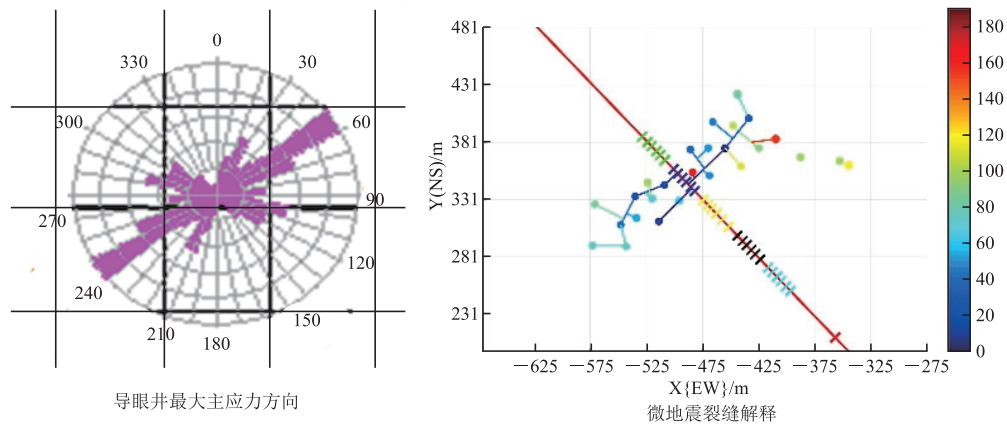


图 11 Well-A 导眼井最大主应力方向统计玫瑰图,和 Well-A3 井第 29 段微地震人工裂缝解释结果  
Fig. 11 Maximum principal stress direction rose map of well-A and micro-seismic artificial fracture interpretation result of well-A3

### 3 结论

聚焦页岩油气地应力地震精细预测科学问题,笔者提出了一种基于各向异性理论的地应力定量地震预测技术,并在合成数据和实际资料中进行了测试与应用,得出如下结论和认识。

1) 基于 HTI 介质假设的 Ruger 反射系数近似方程,构建了具有四参数的叠前 AVAZ 反射系数近似公式,有效减少了反演的模型参数,为叠前 AVAZ 反演与地应力地震预测奠定基础。

2) 基于贝叶斯反演理论,实现弹性参数和裂缝岩石物理参数的稳定、可靠反演,进一步基于地应力理论及计算公式,实现水平应力差异系数及地应力方向的准确预测。

3) 合成数据和实际数据的测试与应用效果较好,预测结果与微地震压裂监测及偶极声波测井解释结果具有良好的一致性,通过笔者方法可有效指导水平井井位部署及井轨迹最优设计,因此,笔者提出的方法在非常规页岩油气工区具有广泛的应用前景。

需要指出的是,这里的方法是实现页岩油气储层现今地应力场大小及方向的预测,复杂地质条件下的地应力场准确预测,还需要结合构造地质特征进行精细预测。

#### 参考文献:

[1] 郭旭升,李宇平,腾格尔,等. 四川盆地五峰组—龙

马溪组深水陆棚相页岩生储机理探讨[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 193—201.

GUO X S, LI Y P, TENG G R, et al. Hydrocarbon generation and storage mechanisms of deep-water shelf shales of Ordovician Wufeng Formation-Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 193—201. (In Chinese)

[2] 张金川,徐波,聂海宽,等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136—140.

ZHANG J C, XU B, NIE H K, et al. Exploration potential of shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6): 136—140. (In Chinese)

[3] 邹才能,杨智,朱如凯,等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. 地质学报, 2015, 89(6): 979—1007.

ZOU C N, YANG Z, ZHU R K, et al. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(6): 979—1007. (In Chinese)

[4] LIEURANCE R S. Stress in foundation at Boulder (Hoover) dam[z]. Denver: U. S. Bureau of Reclamation Technical Memorandum, 1933(346).

[5] HAIMSON B C, LEE M Y. Estimation in-situ stress conditions from borehole breakouts and core disk experiment results in granite[C]. Proceedings of the International Workshop on Rock Stress Measurement at Great Depth. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995: 19—24.

[6] 黄荣樽. 地层破裂压力预测模式的探讨[J]. 华东石油学院学报, 1984, 8(4): 335—347.

HUANG R Z. A model for predicting formation frac-

- ture pressure[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 1984, 8(4): 335—347. (In Chinese)
- [7] IVERSON W P. Closure stress calculations in anisotropic formations[C]//All Days, Denver, Colorado, SPE, 1995; 29598.
- [8] 刘允芳,刘元坤. 单钻孔中水压致裂法三维地应力测量的新进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3816—3822.  
LIU Y F, LIU Y K. New development of three-dimensional *in situ* stress measurement by hydraulic fracturing method in single borehole[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (Suppl 2): 3816—3822. (In Chinese)
- [9] SAYERS C M. Geophysics under stress geomechanical applications of seismic and borehole acoustic waves; 2010 Distinguished Instructor Short Course[M]. Tulsa, OK; Society of Exploration Geophysicists, 2010.
- [10] GRAY D, ANDERSON P, LOGEL J, et al. Estimation of stress and geomechanical properties using 3D seismic data[J]. First Break, 2012, 30(3): 59—68.
- [11] 邓金根,陈峥嵘,耿亚楠,等. 页岩储层地应力预测模型的建立和求解[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(6): 59—64.  
DENG J G, CHEN Z R, GENG Y N, et al. Prediction model for *in situ* formation stress in shale reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(6): 59—64. (In Chinese)
- [12] 张广智,陈娇娇,陈怀震,等. 基于页岩岩石物理等效模型的地应力预测方法研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(6): 2112—2122.  
ZHANG G Z, CHEN J J, CHEN H Z, et al. Prediction for *in situ* formation stress of shale based on rock physics equivalent model[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(6): 2112—2122. (In Chinese)
- [13] 袁萌,蒲勇,缪志伟等. 川东南地应力定量预测方法研究及应用[C]. 中国石油学会 2021 年物探技术研讨会论文集, 中国成都, 2021. 09. 27—29.  
YUAN M, PU Y, MIU Z W, et al. Research and application of stress quantitative prediction in southeast Sichuan Basin[C]. The 2021 Geophysical Exploration Technology Seminar proceedings of Chinese Petroleum Society, China Chengdu, 2021. 09. 27—29. (In Chinese)
- [14] BACKUS G E. Long-wave elastic anisotropy produced by horizontal layering[J]. Geophysics, 1962, 67(11): 4427—4440.
- [15] SCHOENBERG M. Orthorhombic media: Modeling elastic wave behavior in a vertically fractured earth[J]. Geophysics, 1997, 62(6): 1954.
- [16] R"UGER A. Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media[J]. Geophysics, 1998, 63(3): 935.
- [17] GRAY F D. Methods and systems for estimating stress using seismic data; US8619500[P]. 2013—12—31.

## Stress seismic prediction based on anisotropic equivalent medium theory

XU Kai<sup>1,2</sup>, ZHANG Guangzhi<sup>1</sup>, SUN Zhentao<sup>1,2</sup>, WANG Shixing<sup>2</sup>, SU ling<sup>2</sup>, YANG Qian<sup>2</sup>

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. SINOPEC Geophysical Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

**Abstract:** With the technological development of unconventional oil and gas exploration and development, especially the need for efficient shale oil and gas extraction, accurate stress prediction is crucial for designing shale horizontal well trajectories and selecting favorable fracturing areas. In order to obtain the stress magnitude and direction, firstly, we should get the elastic parameters and fracture rock physics parameters; we carry out the high-precision pre-stack AVAZ inversion using wide-azimuthal seismic data based on the anisotropic equivalent medium theory and then driven by the anisotropic rock physical model of shale. Secondly, combined with the stress prediction model, we realize the quantitative prediction that includes the magnitude and direction of the stress. The theoretical model test and practical data application show that this stress prediction method has high accuracy, the results of stress prediction conform to the geological rule, and have good consistency with the results of micro-seismic fracturing monitoring and log data. It can effectively guide the shale horizontal well trajectory design and fracturing scheme deployment.

**Keywords:** shale oil and gas; stress; anisotropy; AVAZ inversion; different horizontal stress coefficient; stress direction