

# 基于 VTI 介质的页岩储层地应力预测方法及应用研究

何成<sup>1,2</sup>, 程冰洁<sup>1,2</sup>

(1. 成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 成都 610059;

2. 成都理工大学“地球勘探与信息技术”教育部重点实验室, 成都 610059)

**摘要:** 地应力对页岩气的采集及储层改造具有重要的指导作用, 准确的地应力预测可以为优化压裂改造提供依据。页岩储层纵向上存在各向异性特征, 为提高页岩储层地应力预测精度, 将页岩储层等效为横向各向同性介质 (VTI) 模型, 结合等效模型刚度矩阵参数、弹性系数及结构应变系数, 开展页岩储层地应力场及应力差异比的三维模拟, 预测水平主应力值、应力方向及应力差异比; 并将地应力与储层裂缝、含气量相关参数相结合, 分析三者之间存在的联系, 并将该方法应用于试验工区龙马溪组页岩储层的地应力预测中。结果表明, 基于 VTI 介质模型的地应力预测结果相较于基于各向同性模型的精度更高, 工区应力差异比整体较大, 进行压裂改造较困难, 压裂不易形成较好的裂缝网络; 随水平最大主应力的增大, 曲率值减小, 含气量存在减小的趋势。

**关键词:** 页岩储层; VTI 介质; 地应力; 应力差异比; 裂缝; 含气量

**中图分类号:** TE311 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.03.02

## 0 引言

页岩气作为非常规油气藏, 其储层有低孔、低渗的特性, 须经过大规模压裂改造才可获得商业价值, 而地应力对压裂改造有重要指导作用, 针对页岩地层的特征开展地应力研究是进行页岩储层开采的必要环节<sup>[1]</sup>。地应力与油气的运移和聚集有密切的联系, 同时为钻井过程中井壁稳定分析、水平井优化设计等提供重要的依据, 准确的储层地应力预测是至关重要的。

地应力研究历史悠久, 为准确预测页岩地层地应力, 国内外学者开展了一系列研究。Dinnik<sup>[2]</sup>于1925年提出最原始的各向同性地层地应力计算模型, 但未考虑孔隙压力等因素, 不适用于实际地层。黄荣樽<sup>[3]</sup>提出新的各向同性地层地应力计算模型即

黄氏模型, 但只适用于构造运动平缓的地层, 后续针对模型的不足进行改进, 可计算构造运动剧烈地层的地应力分布, 称为弹簧模型。由于页岩的结构特性, 利用各向同性模型计算地层地应力会导致结果精度较低, 而横向各向同性模型更符合页岩地层实际情况<sup>[4]</sup>。Thiercelin<sup>[5]</sup>基于横向各向同性地层, 提出新的地应力计算模型, 该模型主要考虑了上覆岩层压力及构造应力对地应力的影响, 区分了地层在水平与垂直方向上力学性质的不同。Higgins<sup>[6]</sup>利用横向各向同性地层地应力计算模型对实际页岩工区进行预测, 取得了较好的应用效果。邓金根等<sup>[7]</sup>推导了线弹性横向各向同性地层地应力计算模型, 根据声波测井资料求取岩石力学参数与刚度矩阵, 利用刚度矩阵求取模型地应力分布特征。根据页岩储层特性, 将其等效为具有垂直对称轴的横向各向同性介质 (VTI, Vertical transverse isotropy) 进

收稿日期: 2022-11-17

基金项目: 国家自然科学基金面上基金(42074160)

第一作者: 何成(1996—), 男, 硕士, 主要从事石油地震勘探研究, E-mail: 820136118@qq.com。

通信作者: 程冰洁(1977—), 女, 教授, 主要从事油气地球物理勘探方面的研究工作, E-mail: chengbingjie09@cdut.edu.cn。

行研究,张光智等<sup>[8]</sup>根据页岩地层中矿物、流体等特征,以 VTI 介质为基质,建立等效物理模型,利用等效模型刚度矩阵计算地层地应力。邹贤军<sup>[9]</sup>通过速度回归拟合方法计算 VTI 介质刚度矩阵参数,从而实现地层地应力的预测。夏宏泉<sup>[10]</sup>在 Bowers 法求取地层孔隙压力及考虑层理因素的基础上,实现 VTI 地层地应力预测。田鹤<sup>[11]</sup>在将页岩储层等效为 VTI 介质模型基础上,利用声波测井资料确定刚度矩阵参数进而求取地层地应力,并给出不同数据计算步骤,但未给出相关参数的计算方法。陈乔<sup>[12]</sup>针对其不足,对本构关系进行推导并给出各刚度矩阵参数的计算公式。但这些方法需要输入的弹性参数较多且难以获取,限制了其在页岩气藏的勘探开发中的应用。

笔者根据页岩储层的各向异性特征,将页岩储层等效为 VTI 介质模型。在弹性参数较少的情况下,利用地震数据、测井数据及构造层面信息对页岩储层地应力及应力差异比分布进行三维预测;综合分析地应力、储层裂缝及含气量相关属性参数之间的关系,形成基于 VTI 介质的页岩储层地应力预测方法。利用该方法对试验工区页岩储层地应力及应力差异比进行三维预测,将计算结果与单井三轴应力实验结果对比,验证了预测结果的合理性,得到地应力、储层裂缝及含气量之间的联系,为优化水平压裂改造,提高页岩气产量提供理论依据。

## 1 方法原理

### 1.1 VTI 介质地应力预测方法

大多数地应力计算模型是针对各向同性储层建立的,如:Dinnik 模型、Matthews 模型、Kelly 模型、黄氏模型及弹簧模型等。

针对横向各向同性的地层,通常使用 Thiercelin 模型<sup>[13]</sup>计算地应力,即:

$$\sigma_H = \frac{E_h}{E_v} \frac{v_v}{1-v_h} (\sigma_v - \alpha P_P) + \alpha P_P + \frac{E_h}{1-v_h} \epsilon_H + \frac{v_h E_h}{1-v_h^2} \epsilon_h \quad (1)$$

$$\sigma_h = \frac{E_h}{E_v} \frac{v_v}{1-v_h} (\sigma_v - \alpha P_P) + \alpha P_P + \frac{E_h}{1-v_h} \epsilon_h + \frac{v_h E_h}{1-v_h^2} \epsilon_H \quad (2)$$

式中: $E_v$  和  $E_h$  分别为垂向和水平向的杨氏模量, GPa; $\epsilon_H$ 、 $\epsilon_h$  为水平最大、最小主应力的构造应变;

$v_v$  和  $v_h$  分别为垂向和水平方向的泊松比; $\sigma_H$ 、 $\sigma_h$  为水平最大主应力、水平最小主应力, MPa; $\sigma_v$  为上覆岩层(垂向)压力; $P_P$  为地层孔隙压力, MPa; $v$  为岩石静态泊松比; $\alpha$  为 Biot 系数,通常值取 1。

利用 VTI 介质刚度矩阵,可进一步表示杨氏模量及泊松比:

$$\begin{cases} E_v = C_{33} - \frac{2C_{13}^2}{C_{11} + C_{12}} \\ v_v = \frac{C_{13}}{C_{11} + C_{12}} \\ E_h = \frac{(C_{11} - C_{12})(C_{11}C_{33} - 2C_{13}^2 + C_{12}C_{33})}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2} \\ v_h = \frac{C_{12}C_{33} - C_{13}^2}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2} \end{cases} \quad (3)$$

其中地层密度与速度可以表示刚度矩阵参数:

$$\begin{cases} C_{11} = \rho v_{p1}^2 \\ C_{33} = \rho v_{p2}^2 \\ C_{44} = \rho v_{s1}^2 \\ C_{66} = \rho v_{s2}^2 \\ C_{13} = \sqrt{(\epsilon - 2\sigma)(\epsilon - 2\sigma)} - C_{44} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\epsilon = C_{11} + C_{44}$ ,  $\epsilon = C_{33} + C_{44}$ ,  $\sigma = \rho v_{p45}^2$ ,  $\rho$  为体积密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $v_{p1}$  和  $v_{s1}$  分别为水平方向的纵波速度与横波速度,  $\text{m/s}$ ;  $v_{p45}$  为与地层夹角为  $45^\circ$  时的纵波速度,  $\text{m/s}$ ;  $v_{p2}$  和  $v_{s2}$  分别为垂直方向的纵波速度与横波速度,  $\text{m/s}$ ;

将公式(3)代入公式(1)、(2)可化简得到:

$$\sigma_H = \frac{C_{13}}{C_{33}} (\sigma_v - \alpha P_P) + \alpha P_P + (C_{11} - \frac{C_{13}^2}{C_{33}}) \epsilon_H + (C_{12} - \frac{C_{13}^2}{C_{33}}) \epsilon_h \quad (5)$$

$$\sigma_h = \frac{C_{13}}{C_{33}} (\sigma_v - \alpha P_P) + \alpha P_P + (C_{11} - \frac{C_{13}^2}{C_{33}}) \epsilon_h + (C_{12} - \frac{C_{13}^2}{C_{33}}) \epsilon_H \quad (6)$$

### 1.2 基于曲率属性的地应力方位角预测方法

在薄板弯曲原理加上前提条件下,根据广义胡克定律对应变可表示为:

$$\begin{cases} \epsilon_x = -z \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{(\sigma_x - \nu \sigma_y)}{E} \\ \epsilon_y = -z \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{(\sigma_y - \nu \sigma_x)}{E} \\ \gamma_{xy} = -2z \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} \end{cases} \quad (7)$$

Roberts 提出通过最小二乘法,拟合含二次趋

势函数代替地层平面趋势,通过二次趋势函数计算地层平面各个点的曲率属性,拟合函数表示为:

$$\omega(x,y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (8)$$

根据曲率定义,计算曲率分量:

$$\begin{cases} K_x = -\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = -2a \\ K_y = -\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} = -2b \\ K_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} = -c \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)代入式(7)可得应力表达式:

$$\begin{cases} \sigma_x = -\frac{2Ez}{1-\nu^2}(a + \nu b) \\ \sigma_y = -\frac{2Ez}{1-\nu^2}(b + \nu a) \\ \tau_{xy} = -\frac{E}{2(1+\nu)}c \end{cases} \quad (10)$$

地层水平主应力及方向可表示为:

$$\begin{cases} \sigma_H = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \\ \sigma_h = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \\ \tan \alpha = \frac{\sigma_H - \sigma_x}{\tau_{xy}} \\ \tan \beta = \frac{\tau_{xy}}{\sigma_h - \sigma_y} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$ 为 $\sigma_H$ 、 $\sigma_h$ 分别与 $x$ 、 $y$ 轴的夹角。

### 1.3 地应力与储层裂缝、含气性属性参数关系分析

为讨论地应力、储层裂缝和含气性之间的关系,在获取地应力三维分布的基础上,分析工区测井资料,获取单井不同深度的含气量,同时,利用曲率属

性表征裂缝发育作为研究三者关系的基础。统计单井相同深度段的水平最大主应力、曲率属性和储层含气量的大小,分别讨论地应力属性参数与曲率属性的关系、曲率属性与储层含气量的关系、地应力与储层含气量的关系来进行研究。

### 1.4 基于三维地震数据的地应力预测流程

目前VTI介质刚度矩阵多用于测井资料计算,笔者利用VTI介质刚度矩阵对页岩储层进行三维地应力场预测,需要目的层位的速度信息、密度信息及孔隙压力等岩性参数信息如图1所示,为地应力预测流程。

第一步:利用井资料分析声波时差、地层孔隙压力等特征,利用改进的自适应Eaton公式<sup>[14]</sup>计算地层Eaton指数,确定适合工区三维预测的Eaton指数,地层孔隙压力计算结果误差在10%之内,是提高三维地应力预测结果精度的关键因素。

第二步:利用三维偏移速度进行时深转换,并对纵横波速度使用Backus平均法求取水平及垂直方向纵横波速度,将MANNIE3模型与工区弹性参数结合,求取VTI介质刚度矩阵参数及构造系数三维分布,三维刚度矩阵参数精度是影响地应力预测结果的主要因素。

第三步:根据构造曲率法拟合地层曲率分量趋势面,结合目的层位深度计算层位曲率属性,进一步求取水平最大主应力方向,其与普通曲率法相比有更高的准确率。

第四步:根据地层孔隙压力、构造系数、泊松比、杨氏模量等参数等数据实现利用刚度矩阵对页岩地层水平最大主应力、水平最小主应力及水平应力差进行三维预测。关键点在于利用井点结果进行参数调整,提高预测精度。

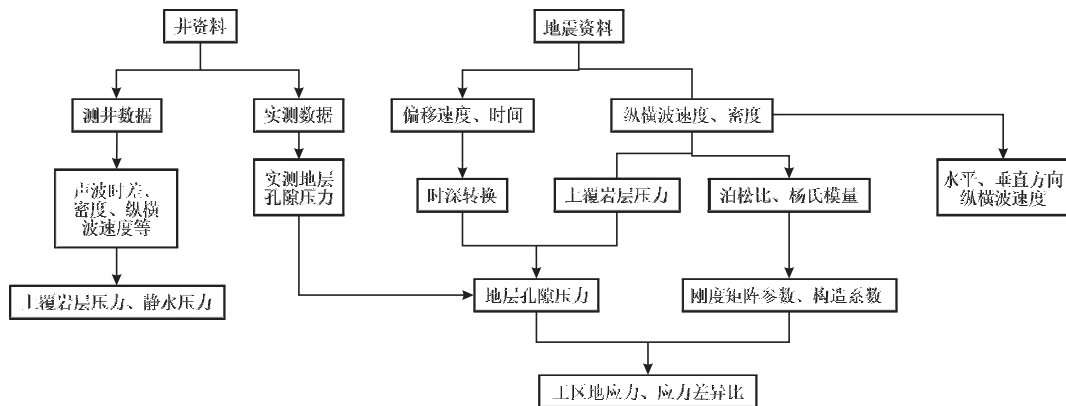


图1 地应力预测流程图

Fig.1 Flow chart of in-situ stress prediction

## 2 应用实例

### 2.1 地质概况

这里应用工区位于四川盆地中南部的白马镇向斜,区域构造隶属于川西南低褶构造带,白马镇向斜北部紧邻威远大型背斜并受其影响,东南部为自流井背斜,区内构造平缓,总体呈“两凹一凸”局部构造特征<sup>[15]</sup>。区域内断层及裂缝主为小断层发育及平缝发育,构造缝整体不发育<sup>[16]</sup>。

目的层系为上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩,其厚度为 80 m~90 m,埋深大于 3 500 m。上奥陶统五峰组包含上、下两段,上段发育灰、黑色含放射虫炭质笔石页岩,下段发育灰黑—黑灰色含生屑灰质页岩。下志留统龙马溪组地层以灰 黑色、黑色炭质笔石页岩、炭质放射虫笔石页岩为主,岩芯取样如图 2 所示。根据岩性可详细分为 8 段<sup>[17]</sup>。岩性、测井、地质背景等资料综合分析,该区五峰

组—龙马溪组整体为陆棚相<sup>[18]</sup>,具有“五高一低”特征: TOC 含量高、孔隙度高、硅含量高、脆性高、含气量高、黏土含量低<sup>[19]</sup>。

WY23 井储层物性较差,孔隙度平均值为 1.16%,渗透率平均值为  $0.062\ 14 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。其孔、渗分布频率及岩样照片如图 3 所示。图 4 为 WY23 井各层位矿物组成图,岩石矿物组分主要以石英、黏土矿物为主,斜长石次之。石英含量在 28%~42%,斜长石含量在 9%~13%,黏土含量相对较高,为 28%~42%。

工区应用数据均来自工区振幅数据,图 5 为工区振幅信噪比图,可以看出:蓝色部分为断裂带及断层部位,信噪比较低;红色与绿色部分为非断裂带及断层部位,信噪比较高即有效信号较多,符合构造信息,表明工区基础资料的可靠性。

### 2.2 地应力方向及大小预测

页岩气工区预测水平最大主应力主方向为近东西向,地应力方向在断层区域发生明显变化,与断层附近地应力方向存在显著不同,如图 6 所示。



图 2 WY23 井岩芯图

Fig. 2 Core diagram of well WY23

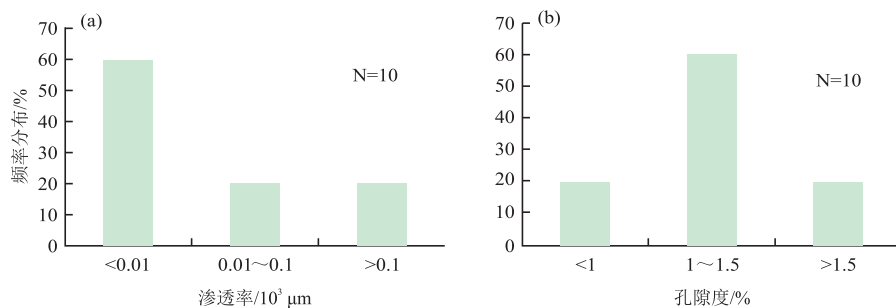


图 3 WY23 井渗透率及孔隙度分布直方图

Fig. 3 Permeability and porosity distribution histogram of well WY23

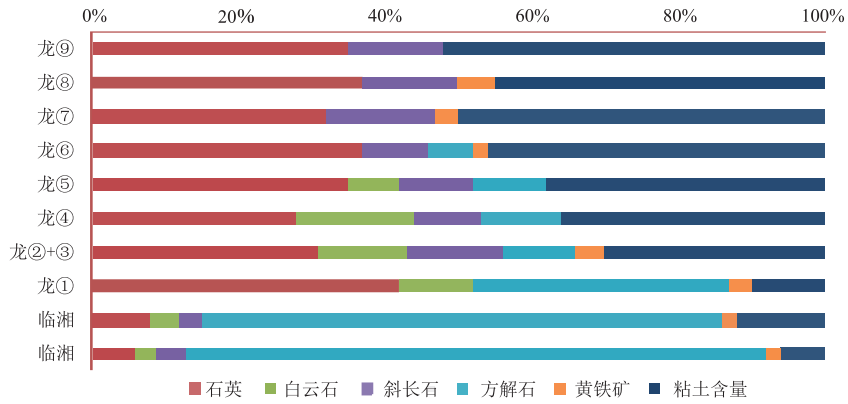


图4 WY23 井各层位矿物组成

Fig. 4 Mineral composition of each horizon in well WY23

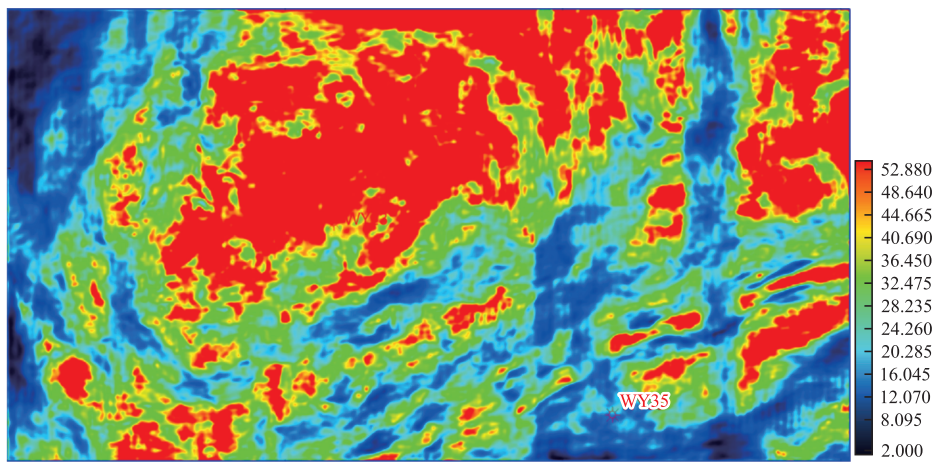
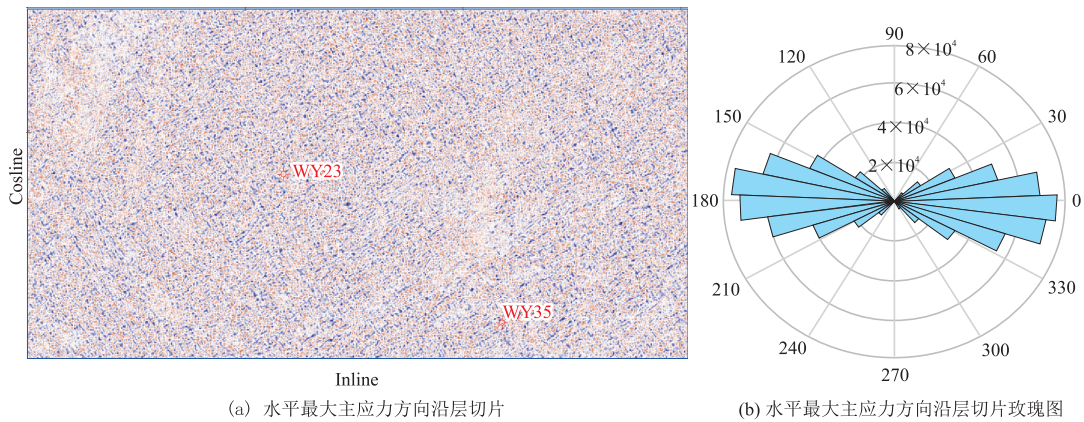


图5 工区振幅信噪比图

Fig. 5 Amplitude signal-to-noise ratio diagram of work area



(a) 水平最大主应力方向沿层切片

(b) 水平最大主应力方向沿层切片玫瑰图

图6 工区水平最大主应力方向

Fig. 6 Direction of horizontal maximum principal stress in work area

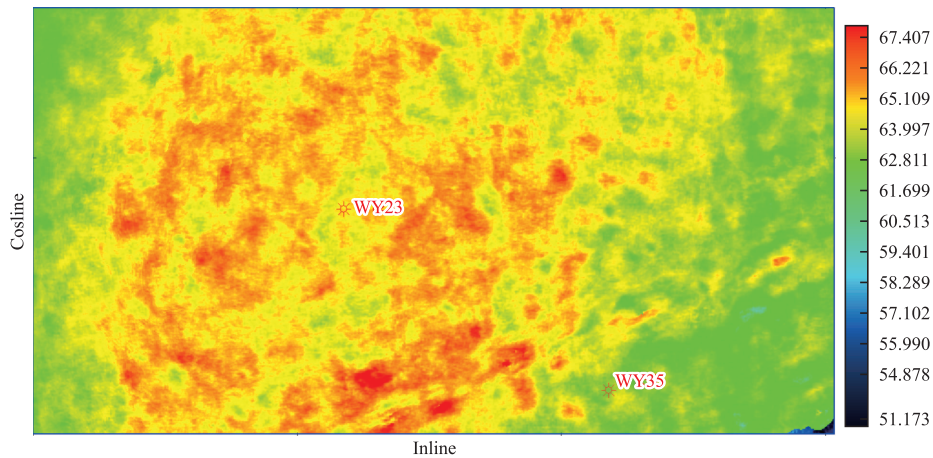


图 7 工区 VTI 模型水平最小主应力分布沿层切片

Fig. 7 Minimum horizontal principal stress distribution along slice of VTI model in work area

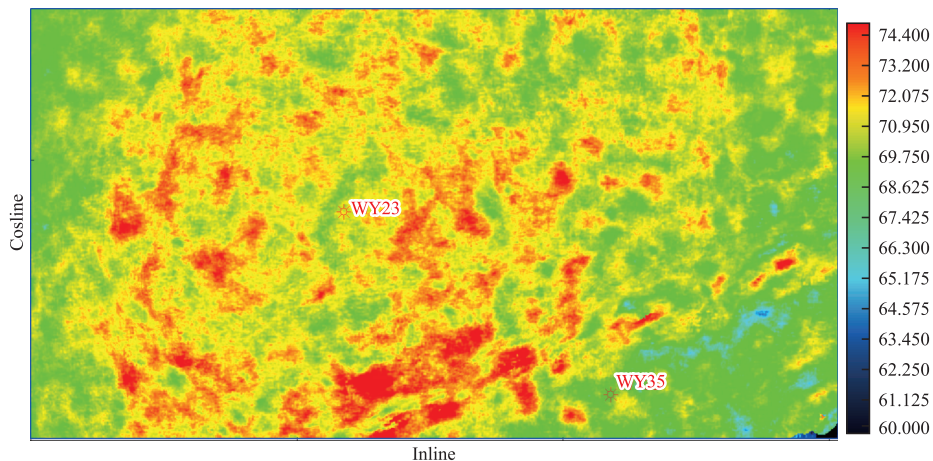


图 8 工区 VTI 模型水平最大主应力分布沿层切片

Fig. 8 Section along layer for horizontal maximum principal stress distribution of VTI model in work area

图 7、图 8 分别为 VTI 介质模型水平最小、最大主应力大小预测结果,将 VTI 介质模型地应力计算结果与单井三轴实验地应力计算结果对比验证,结果如下表 1 所示,发现 VTI 介质模型地应力计算结果误差整体小于 10 Mpa,误差不超过 10%,结果较为准确。预测结果表明工区水平最大主应力整体大于水平最小主应力,小于上覆岩层压力,水平最大、最小主应力的分布特征整体相同。研究工区水平最大主应力值介于 55 Mpa ~ 105 Mpa,研究区沿层切片向斜核部为应力高值区域,应力分布稳定,其值介于 72 Mpa ~ 80 Mpa;东、西侧的向斜两翼为应力低值区,值为 66 Mpa ~ 76 Mpa。研究工区水平最小主应力值介于 50 Mpa ~ 80 Mpa,工区层位水平最小主应力其值介于 58 Mpa ~ 78 Mpa。层位切片的向斜核部为高应力值区域,其应力值介于 69 Mpa ~ 78 Mpa。东、西侧的向斜两翼为应力低值区,值介

于 58 Mpa ~ 75 Mpa。

表 1 VTI 模型最大主应力预测和 WY23 单井计算结果  
Tab. 1 Maximum principal stress prediction of VTI model and calculation results of WY23 single well

深度 /m	VTI 模型主应力 /Mpa	单井主应力 /Mpa	误差 /Mpa	误差百分比 /%
3 775.4	89.21	85.05	-4.16	4.90
3 781.8	89.58	84.72	-4.86	5.74
3 792.1	82.97	83.27	0.3	0.36
3 799.2	79.68	84.39	4.71	5.58
3 808.7	78.48	83.48	5	6.00
3 815.9	80.43	86.43	6	6.95

### 2.3 水平应力差异比

在压裂过程中,裂缝在地层中总是沿水平最大主应力的方向延伸,对页岩储层而言,裂缝网络可以很好地连通天然裂缝<sup>[20]</sup>,因此压裂产生的裂缝可以在地层中形成裂缝网络,将会取得较好的改造效果。

水平主应力差异比对地层进行压裂改造形成的裂缝存在影响,当水平主应力差异比较大时,水力压裂可以不易形成较长简单的、方向性较强的平面型裂缝<sup>[21]</sup>。水平最大、最小主应力之间的差异越大,岩石破裂的可能性更高,越容易破裂形成裂缝。在地应力均质性较低处,不利于裂缝网络的形成,从而影响水平井的压裂改造效果。图 9 为 VTI 模型应力差异比,发现工区水平应力差异比介于 0.09 ~ 0.22 之

间,从图 7 可以看出,研究工区的水平应力差异比值整体较大,表明工区的水平应力值差异较大,工区中部及右下部位的水平应力差异比较高,其水平应力差异比介于 0.15 ~ 0.22 之间,其余区域的应力差异比较小。WY23 和 WY35 井区域水平应力差异比为 0.16,工区可进行压裂改造,但不能形成良好的裂缝网络,在井附近水平应力差异比较小的区域进行压裂改造取得的效果好于高水平应力差异比区域。

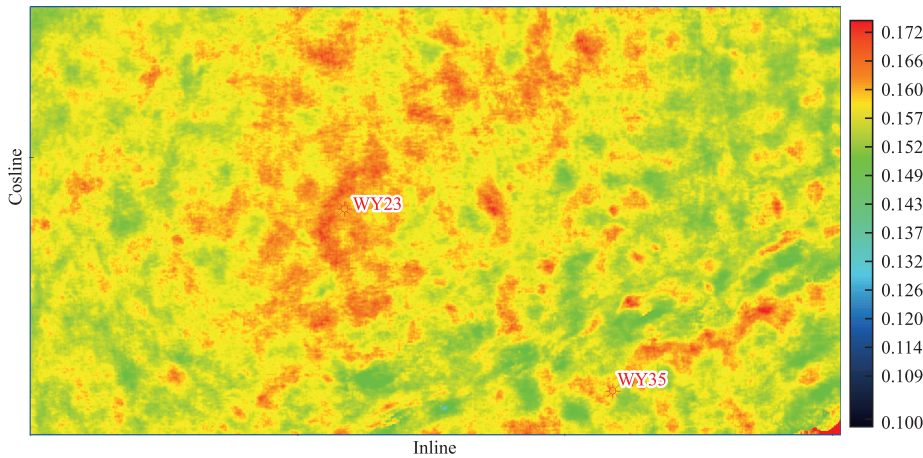


图 9 工区 VTI 模型水平应力差异比沿层切片

Fig. 9 Slicing along layers for horizontal stress difference ratio of VTI model in work area

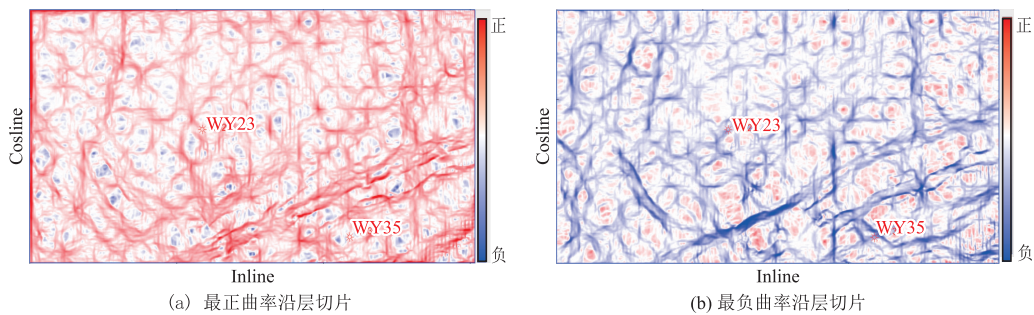


图 10 工区曲率沿层切片

Fig. 10 Curvature slicing along layers

2.4 页岩储层裂缝发育特征预测

裂缝为页岩气提供存储空间及运输通道,其中曲率、相干等属性与断层、裂缝存在一定联系。利用曲率属性对工区的断层及裂缝进行初步识别分析。在曲率属性中,运用最正曲率和最负曲率可对断层和裂缝进行识别与判定;曲率变化大的部位、断层两侧是裂缝的主要发育区<sup>[22]</sup>。图 10(a)、(b)可以看出,在 WY23 井附近,存在多个较小连续部位的曲率异常,为中心的低凹构造带,发育微裂缝;WY35 井存在明显的曲率响应异常,位于断裂显著发育的低凹边缘。

表 2 WY23 井水平最大主应力、曲率及含气量皮尔逊系数

Tab. 2 Pearson coefficient of maximum horizontal principal stress, curvature and gas content in well WY23

	水平最大主应力	最大正曲率	最小负曲率	含气量
水平最大主应力	1	-0.8 459	-0.6 444	-0.4 317
最大正曲率	-0.8 459	1	0.9 287	0.6 909
最小负曲率	-0.6 444	0.9 287	1	0.7 842
含气量	-0.4 317	0.6 909	0.7 842	1

2.5 应用分析

地应力、储层裂缝及含气量属性参数之间存在一定的关系;地层在形成裂缝发育的过程中会释放

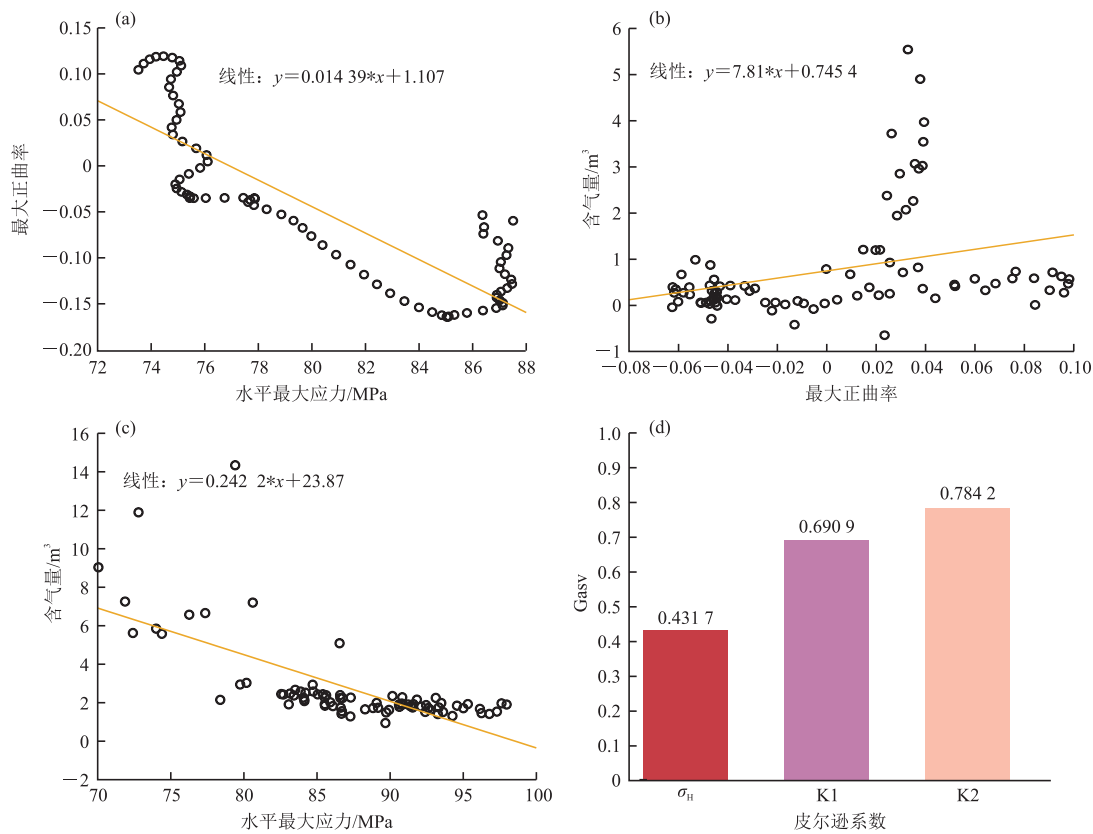


图 11 WY23 井地应力、曲率、含气量关系及各属性皮尔逊相关系数绝对值

Fig. 11 Absolute values of in-situ stress, curvature, gas content and Pearson correlation coefficient of each attribute in well WY23

部分能量,会导致裂缝发育部位其地应力偏小。裂缝为页岩气提供存储空间及运移通道,裂缝发育程度越好,其储层含气量越高,二者为正相关关系。

针对 WY23 井,对其地应力、储层裂缝及含气量进行综合分析,提取三个属性的相关参数,分别进行线性拟合,分析三者之间存在的直接或间接关系。图 11(a)表明随水平最大主应力的增大,曲率减小,二者呈现了一定的负相关;图 11(b)为最大正曲率与储层含气量的统计,随曲率值增大,储层含气量有增大的趋势;图 11(c)为水平最大主应力与 WY23 井含气量关系,水平最大主应力增大,井含气量减小;图 11(d)为 WY23 井含气量皮尔逊相关系数绝对值统计结果,直观展示了井含气量与水平最大主应力及曲率属性的相关性;表 2 为各属性相关皮尔逊系数,反映了各参数之间的统计特征,皮尔逊相关系数值绝对值越大,表征属性之间相关性越强,水平最大主应力与曲率属性存在较强的相关性,曲率属性与含气量存在较强的负相关性,但水平最大主应力与含气量存在较弱的负相关。综合分析得到:在一定范围内,水平最大主应力增大,曲率值存在减小

的趋势即裂缝相对不发育部位,含气量减小。

### 3 结 论

1) VTI 介质等效模型较各向同性介质模型的地应力计算结果的误差更小,精度更高,其地应力计算结果与单井实测结果相近,实现了较为准确的地应力场三维预测,为页岩气压裂改造提供参考依据。

2) 实际应用表明: 试验工区页岩储层水平最大主应力方向为近东西向且应力差异比整体较大,在地应力较低且应力差异比较小处,进行水平井压裂改造,可以取得较好的压裂改造效果。

3) 各属性皮尔逊相关系数表明,地应力与储层裂缝、含气量的属性参数存在一定关联:在一定范围内,随着水平最大主应力的增大,曲率值减小即裂缝相对不发育部位,含气量有减小的趋势。

#### 参考文献:

- [1] 印兴耀, 马妮, 马正乾, 等. 地应力预测技术的研究现状与进展[J]. 石油物探, 2018, 57(4): 488-504.

- YIN X Y, MA N, MA Z Q, et al. Review of in situ stress prediction technology[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2018, 57(4): 488—504. (In Chinese)
- [2] DINNIK A N. On rock pressure and calculating the vertical shaft support [J]. *Inzhenernyi Robotnik*, 1925, 7: 1—12.
- [3] 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(自然科学版)*, 1984, 8(4): 335—347.  
HUANG R Z. A model for predicting formation fracture pressure[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 1984, 8(4): 335—347. (In Chinese)
- [4] JOHNSTON J E, CHRISTENSEN N I. Seismic anisotropy of shales [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, 100(B4): 5991—6003.
- [5] THIERCELIN M J, PLUMB R A. Core-based prediction of lithologic stress contrasts in east texas formations[J]. *SPE Formation Evaluation*, 1994, 9(4): 251—258.
- [6] HIGGINSS, GOODWIN S, DONALD A, et al. Anisotropic stress models improve completion design in the Baxter shale[C]//All Days. September 21—24, 2008. Denver, Colorado, USA. SPE, 2008: 1—10.
- [7] GRAY F D, SCHMIDT D P, DELBECQ F. Optimize shale gas field development using stresses and rock strength derived from 3D seismic data[C]//All Days. October 19—21, 2010. Calgary, Alberta, Canada. SPE, 2010: 1—7.
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] 田鹤, 曾联波, 舒志国, 等. 页岩横向各向同性地应力预测模型中弹性参数的确定方法[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(2): 166—176.  
TIAN H, ZENG L B, SHU Z G, et al. Method for determining elastic parameters for the prediction model of shale transversely isotropic geostress[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(2): 166—176. (In Chinese)
- [11] 陈乔, 徐烽淋, 赵彬凌, 等. 渝东南页岩储层地应力计算方法[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1650—1659.  
CHEN Q, XU F L, ZHAO B L, et al. Calculation method for in situ stress of shale reservoir in Southeast Chongqing[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1650—1659. (In Chinese)
- [12] 舒红林, 仇凯斌, 李庆飞, 等. 页岩气地质力学特征评价方法: 中国南方海相强改造区山地页岩地质力学特征[J]. *天然气工业*, 2021, 41(增刊1): 1—13.  
SHU H L, QIU K B, LI Q F, et al. Evaluation method of geomechanical characteristics of shale gas-Geomechanical characteristics of mountain shale in China southern marine strong transformation area[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(S1): 1—13. (In Chinese)
- [13] LI H, ZOU Y S, LIU S, et al. Prediction of fracture initiation pressure and fracture geometries in elastic isotropic and anisotropic formations[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(3): 705—717.
- [14] 任远飞. 自适应孔隙流体压力预测方法研究及应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.  
REN Y F. Research and application of adaptive pore fluid pressure prediction method [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020. (In Chinese)
- [15] 蔡勋育, 赵培荣, 高波, 等. 中国石化页岩气“十三五”发展成果与展望[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 16—27.  
CAI X Y, ZHAO P R, GAO B, et al. Sinopec's shale gas development achievements during the “Thirteenth Five-Year Plan” period and outlook for the future[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 16—27. (In Chinese)
- [16] 曹学军, 王明贵, 康杰, 等. 四川盆地威荣区块深层页岩气水平井压裂改造工艺[J]. *天然气工业*, 2019, 39(7): 81—87.  
CAO X J, WANG M G, KANG J, et al. Fracturing technologies of deep shale gas horizontal wells in the Weirong Block, southern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(7): 81—87. (In Chinese)
- [17] 易积正, 王超. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组海相页岩储层非均质性特征[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(1): 13—19.  
YI J Z, WANG C. Differential pore development characteristics in various shale lithofacies of Longmaxi Formation in Jiaoshiba Area, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(1): 13—19. (In Chinese)

- Chinese)
- [18] 赵勇, 李南颖, 杨建, 等. 深层页岩气地质工程一体化井距优化: 以威荣页岩气田为例[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(3): 340—347.  
ZHAO Y, LI N Y, YANG J, et al. Optimization of deep shale gas well spacing based on geology-engineering integration: A case study of Weirong Shale Gas Field[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 340—347. (In Chinese)
- [19] 庞河清, 熊亮, 魏力民, 等. 川南深层页岩气富集高产主要地质因素分析: 以威荣页岩气田为例[J]. 天然气工业, 2019, 39(增刊 1): 78—84.  
PANG H Q, XIONG L, WEI L M, et al. Analysis of main geological factors for enrichment and high yield of deep shale gas in south sichuan—Taking Weirong shale gas field as an example[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(S1): 78—84. (In Chinese)
- [20] 翟文宝, 李军, 周英操, 等. 基于测井资料的页岩储层可压裂性评价新方法[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(3): 112—123.  
ZHAI W B, LI J, ZHOU Y C, et al. New evaluation method of shale reservoir fracability based on logging data[J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(3): 112—123. (In Chinese)
- [21] 丛平, 闫建平, 井翠, 等. 页岩气储层可压裂性级别测井评价及展布特征: 以川南 X 地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(3): 177—188.  
CONG P, YAN J P, JING C, et al. Logging evaluation and distribution characteristics of fracturing grade in shale gas reservoir: A case study from Wufeng Formation and Longmaxi Formation in X area, southern Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(3): 177—188. (In Chinese)
- [22] 赵军, 王淼, 祁兴中, 等. 轮西地区奥陶系地应力方向及裂缝展布规律分析[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(3): 95—99.  
ZHAO J, WANG M, QI X Z, et al. Ground stress direction and fracture distribution law of Ordovician in Lunxi Area[J]. Lithologic Reservoirs, 2010, 22(3): 95—99. (In Chinese)

## In-situ stress prediction method and research of shale reservoir based on VTI medium

HE Cheng<sup>1, 2</sup>, CHENG Bingjie<sup>1, 2</sup>

(1. State Key Laboratory of "Oil and Gas Reservoir Geology and Development Engineering",  
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Key Laboratory of "Earth Exploration and Information Technology" of the  
Ministry of Education, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** In-situ stress plays an important guiding role in shale gas collection and reservoir transformation, and accurate in-situ stress prediction can provide the basis for optimizing fracturing transformation. Longitudinal anisotropy exists in shale reservoirs. In order to improve the accuracy of shale reservoir in-situ stress prediction, shale reservoir is equivalent to transversely isotropic media (VTI) model. Combining with equivalent model stiffness matrix parameters, elastic coefficient and structural strain coefficient, a three-dimensional simulation of shale reservoir in-situ stress field and stress difference ratio is carried out to predict the value, stress direction, and stress difference ratio of horizontal principal stress. The relationship between in-situ stress and related parameters of reservoir fractures and gas content is analyzed. The method is applied to the prediction of ground stress of the Longmaxi Formation shale reservoir in the test work area. The results show that the prediction results of ground stress based on VTI medium model are more accurate than those based on the isotropic model, and the stress difference in the work area is more significant than that of the whole area. Fracturing modification is more complicated, and forming a better fracture network is difficult. With the increase of horizontal maximum principal stress, the curvature value decreases, and the gas content decreases.

**Keywords:** shale reservoir; VTI medium; in-situ stress; stress difference ratio; fracture; gas content