

不同倾角水力裂缝扩展的邻井光纤监测信号特征研究

韦世明^{1,3*}, 郝亚龙^{2,3}, 隋微波^{2,3}, 陈勉^{2,3}

1 中国石油大学(北京)理学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

3 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 100049

* 通信作者, we_shiming@163.com

收稿日期: 2024-01-08; 修回日期: 2024-04-03

国家自然科学基金重点项目(52334001)、国家自然科学基金青年项目(42407252)、中国石油大学(北京)青年拔尖人才项目(ZX20230042)和油气资源与工程全国重点实验室定向课题(PRE/DX-2405)联合资助

摘要 考虑到目前光纤信号解释模型均以垂直裂缝为基础, 当地层中发育天然裂缝与层理面, 将使得水力裂缝在扩展中发生倾斜; 其光纤监测信号也将与垂直裂缝产生差异, 使得现有光纤信号解释模型不再适用。为此, 本文建立了三维倾斜裂缝扩展力学模型, 考虑裂缝扩展过程中的拉伸和剪切力学行为, 并采用有限元方法进行求解, 与 Liu 和 Wu 提出的非连续位移方法对比, 模拟垂直裂缝扩展条件下的光纤信号特征一致, 验证了本文模型的正确性。本文研究了有倾角水力裂缝扩展过程中, 不同倾角、倾斜方向、裂缝高度、光纤监测距离和原始地应力状态对光纤应变和应变率的影响。分析发现: 倾斜水力裂缝扩展时, 邻井光纤监测的应变率瀑布图出现红蓝条带, 当水力裂缝倾角处于 30~55° 时, 出现对称的红蓝应变椭圆和红蓝应变率条带。随着倾斜水力裂缝持续扩展, 倾斜裂缝击中光纤, 应变率瀑布图出现多个心形区。当裂缝倾斜方向发生变化时, 光纤监测的应变和应变率瀑布图也能够反映水力裂缝的倾斜方向。随着水力裂缝高度增加, 应变率瀑布图红色条带宽度增大, 为我们依据光纤监测解释裂缝高度提供了思路。对于同样形态和尺寸的水力裂缝, 不同原始应力状态下的光纤监测信号具有明显的差异, 其中, 正断层应力状态下的光纤监测信号具有最为明显的条带特征。在本文计算条件下, 随着光纤监测距离每增加 100 m, 光纤监测到的应变和应变率信号强度减小一个数量级。本文研究对通过邻井光纤信号解释水力裂缝形态、尺寸, 进而指导邻井光纤布置具有重要指导意义。

关键词 水力压裂; 倾斜裂缝; 邻井光纤; 信号特征

中图分类号: TE319; O439

Research on the characteristics of fiber optic signals for neighboring wells with hydraulic fracture propagation at different inclination angles

WEI Shiming^{1,3}, HAO Yalong^{2,3}, SUI Weibo^{2,3}, CHEN Mian^{2,3}

1 College of Science, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 100049, China

引用格式: 韦世明, 郝亚龙, 隋微波, 陈勉. 不同倾角水力裂缝扩展的邻井光纤监测信号特征研究. 石油科学通报, 2024, 09(05): 764-776
WEI Shiming, HAO Yalong, SUI Weibo, CHEN Mian. Research on the characteristics of fiber optic signals for neighboring wells with hydraulic fracture propagation at different inclination angles. Petroleum Science Bulletin, 2024, 09(05): 764-776. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.05.058

Received: 2024-01-08; Revised: 2024-04-03

Abstract Considering that the current fiber optic signal interpretation models are based on vertical fractures, and the influence of natural fractures and bedding planes makes hydraulic fractures tilted during its propagation process. What's more, its optical fiber monitoring signals will also differ from those produced by vertical fractures, rendering existing optical fiber signal interpretation models inapplicable. Therefore, a three-dimensional inclined fracture propagation model is established in this paper, considering the tensile and shear mechanical behaviors during crack extension, and solved by the finite element method. The model in this paper simulates the fiber optic signal characteristics under vertical crack extension conditions has good agreement with the discontinuous displacement method of Liu and Wu, which verifies the correctness of the numerical model in this paper. After that, we build the geometry model of inclined fractures, the effects of different inclination angles, tilt directions, fracture heights, fiber-optic monitoring distances, and in-situ stress states on fiber-optic strains and strain rates are investigated during the propagation of hydraulic fractures with inclination angles. Some conclusions can be drawn from the simulation results: red and blue bands appear on strain rate waterfall plots monitored by fiber optics in neighboring wells during inclined hydraulic fracture propagation. Symmetrical red and blue strain ellipses and strain rate bands appear when the hydraulic fracture inclination is at 30° to 55°. As the inclined hydraulic fracture continues to propagate, when the inclined fracture hits the fiber, multiple heart-shaped zones appear on the strain rate waterfall map. The fiber-optic-monitored strain and strain-rate waterfall maps are also able to reflect the tilt direction of the hydraulic fracture. The width of the red bands of the strain rate waterfall plot increases with increasing hydraulic fracture height, which provides us with a way of interpreting the height of fractures based on the optical fiber monitoring. For hydraulic fractures of the same morphology and size, the optical fiber monitoring signals under different initial stress states exhibit significant differences, among which, the optical fiber monitoring signals under the normal fault stress state have the most distinct band characteristics. Under the simulation conditions of this paper, with each 100 m increase in fiber-optic monitoring distance, the intensity of the fiber-optic-monitored strain and strain-rate signals decreases by one order of magnitude. The research in this paper is of great significance in guiding the interpretation of hydraulic fracture morphology and size through neighboring well fiber-optic signals and guiding the placement of fiber optics in neighboring wells.

Keywords hydraulic fracturing; inclined fractures; neighboring well fiber; signal characteristics

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.05.058

0 引言

分布式光纤是一种非常有前途的非常规油气藏水力压裂监测技术,包括分布式声学传感(DAS)、分布式温度传感(DTS)和分布式应变传感(DSS)。分布式光纤具有实时、全井段和长时间监测的优点,根据光纤安装的位置,可将光纤监测方法分为同井光纤监测和邻井光纤监测^[1-2]。自2016年起,光纤监测技术逐渐成为水力压裂监测的一种重要手段^[3],用于评价压裂改造效果、水力裂缝形态、暂堵压裂效果评价等方面。

自Jin Ge^[4]首次发现低频DAS信号(<0.05 Hz)能够用于解释裂缝形态以来,国内外学者逐步开展了相应研究。Liu等^[5-7]利用位移不连续法,模拟了裂缝单簇及多簇下击中光纤时的响应,并利用光纤数据反演裂缝击中点位置及裂缝宽度信息。陈铭等^[8]分析总结了裂缝击中光纤前后应变率瀑布图的演化规律。Smith Leggett等^[9-10]通过室内光纤监测压裂,提出了“零应变”定位方法,可用于判断裂缝前缘动态位置。Chen等^[11]将机器学习算法应用于光纤数据处理,辅助判断裂缝击中信息。Srinivasan^[12-13]等利用DDM方法正演

模拟了不同形态裂缝扩展时垂直光纤监测井中光纤的响应信号,尝试解释裂缝高度等相关信息。Shahri等人^[14]分析了三维垂直平面缝扩展过程中的应变特征,研究了多簇裂缝同时扩展和与光纤非垂直情况下的应变瀑布图信号特征。Pudugramam等人^[15]在使用“Res-Frac”模拟器进行三维裂缝扩展模拟时,采用分布式光纤监测结果去校正裂缝模拟结果,但“ResFrac”模拟器仅能考虑垂直裂缝的扩展。

目前通过单条和多条垂直水力裂缝扩展的模型分析发现^[5-8]:邻井光纤监测到的“心形”应变率信号是水力裂缝击中光纤的特征信号。但实际光纤监测到的应变率瀑布图常出现一些非“心形”的“条带状”信号。目前的光纤信号解释模型都假设裂缝为垂直缝,然而,天然裂缝与层理的存在往往使水力裂缝不再保持垂直扩展^[16-17]。刘星等人^[18-19]根据微地震事件点和裂缝面的几何相关性,使用随机模拟一致性算法(RANSAC)识别裂缝面产状,在裂缝几何模型优选的基础上,开发了一套稳健的三维缝网重构方法(RFM3D),并通过微地震事件点重构裂缝网络发现了页岩压裂过程中出现较多的非垂直缝。图1给出了某页岩气水平井单段压裂微地震事件点监测结果与基于

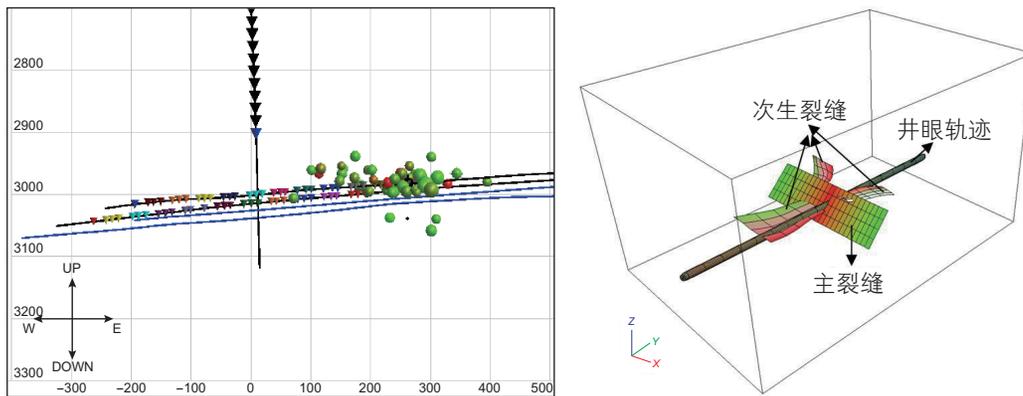


图1 分段监测微地震与缝网反演结果(来自文献[18,20])

Fig. 1 Segmented monitoring of microseismic and fracture network inversions (from references [18,20])

微地震的缝网反演结果,可以看出,形成的水力裂缝均发生一定倾斜。方正等^[20]基于微地震监测和室内压裂实验结果证明了页岩水平井水力裂缝存在倾斜缝。图2给出了室内真三轴水力压裂实验结果,可以看出,水力裂缝受水平层理影响发生明显的倾斜。Ratnayake等人^[21]采用三维位移不连续方法,分析了增强型地热系统中的一个倾斜裂缝在注水过程中的应变场变化规律,及其DSS光纤监测的应变信号特征,然而并未考虑裂缝的扩展。因此,开展倾斜水力裂缝扩展过程中

的光纤监测信号特征研究,对于页岩水力压裂过程中的光纤监测信号解释十分重要。

本文建立了三维空间中倾斜裂缝扩展过程的线弹性力学模型,考虑裂缝的拉伸和剪切力学行为,基于有限元方法进行求解,分析了水力裂缝倾斜角度、倾斜方向、高度、邻井光纤监测距离和地应力状态对裂缝扩展过程中应变和应变率特征的影响。

1 倾斜裂缝的物理模型

实际地层因具有不同角度天然裂缝和层理面,使得水力裂缝扩展过程中发生偏转,不再是垂直缝^[22-23]。为此,本文建立了图3所示的倾斜水力裂缝扩展模型,压裂井的水力裂缝绕Y轴旋转一定角度,与X轴夹角为水力裂缝倾角,本文研究中,水力裂缝倾角取 $0\sim 90^\circ$ 。裂缝中心与邻井监测光纤处于同一水平面,且二者的垂直距离为 $150\sim 350$ m。裂缝倾斜高度为 $30\sim 50$ m,垂向高度为 $30\sim 50\cos\alpha$ m。地层模型尺寸为 $400\text{ m}\times 800\text{ m}\times 100\text{ m}$,地应力方向见图3。

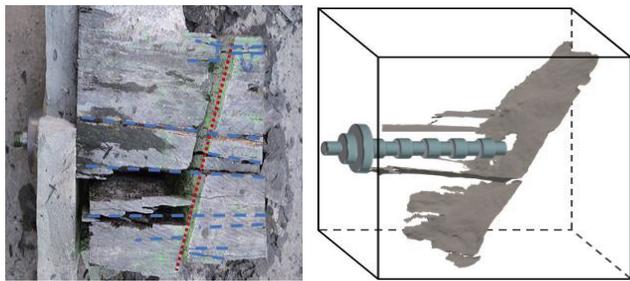


图2 层理性页岩水力压裂实验裂缝形态(来自文献[20])

Fig. 2 Experimental fracture morphology of hydraulic fracturing in layered shale (from reference [20])

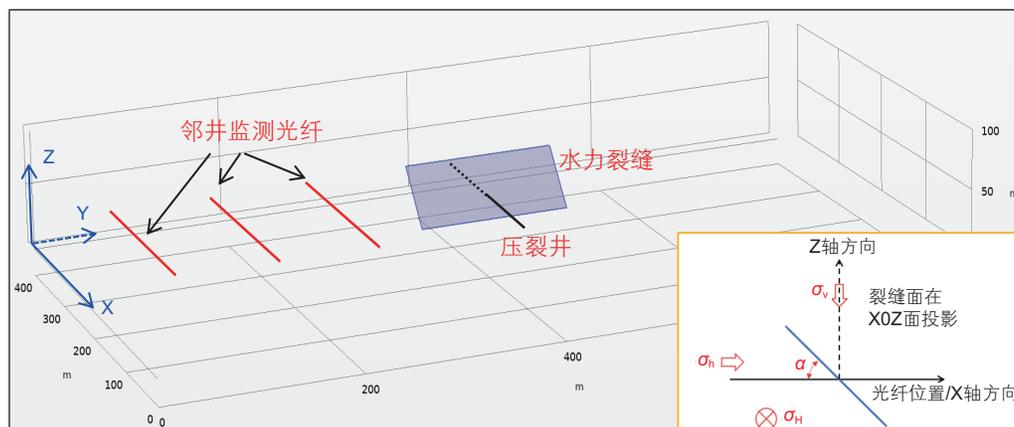


图3 倾斜裂缝与光纤相对位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the position of the inclined fracture relative to the optical fiber

2 数学模型与计算方法

2.1 数学模型

如图 4 所示, 对于一个有倾角的水力裂缝, 裂缝表面可能受拉伸力或剪切力作用, 其上下表面位移不一致, 也即位移不连续, 此时整体岩石的应变能可写作^[24-25]:

$$\pi_p = \int_{\Omega_m} \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon} : \boldsymbol{\sigma} d\Omega_m - \int_{\Gamma_\sigma} \mathbf{u} \cdot \mathbf{T} d\Gamma - \int_{\Gamma_f^+} \mathbf{u}_f^+ \cdot \mathbf{T}_f^+ d\Gamma_f - \int_{\Gamma_f^-} \mathbf{u}_f^- \cdot \mathbf{T}_f^- d\Gamma_f \quad (1)$$

其中, $\boldsymbol{\sigma}$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 分别为应力和应变张量。 \mathbf{u} 为位移矢量。 \mathbf{T} 为边界上的应力。 \mathbf{u}_f^+ 和 \mathbf{u}_f^- 分别为裂缝上下表面的位移矢量。 \mathbf{T}_f^+ 和 \mathbf{T}_f^- 分别为裂缝上下表面的应力矢量。 Γ_σ 为应力边界, Γ_f^+ 和 Γ_f^- 分别代表裂缝上下表面。

当裂缝为拉伸状态, 裂缝上下表面受流体压力作用, 即:

$$\mathbf{T}_f^+ = p \cdot \mathbf{n}_f^+, \quad \mathbf{T}_f^- = p \cdot \mathbf{n}_f^- \quad (2)$$

其中, p 为裂缝内压力。 \mathbf{n}_f^+ 和 \mathbf{n}_f^- 分别为裂缝上下表面的单位法向量。

当裂缝为剪切状态时, 裂缝上下表面受地应力作用产生剪切力, 此时:

$$\mathbf{T}_f^+ = \mu T_n \cdot \mathbf{t}_f^+, \quad \mathbf{T}_f^- = \mu T_n \cdot \mathbf{t}_f^- \quad (3)$$

$$T_n = -p_n \min(\mathbf{u}_f^+ - \mathbf{u}_f^-, 0) \quad (4)$$

其中, T_n 为裂缝面的法向应力。 μ 为裂缝面摩擦系数。 \mathbf{t}_f^+ 和 \mathbf{t}_f^- 分别为裂缝上下表面切向量。 p_n 为惩罚因子, 即一个十分大的刚度系数^[26]。实际计算中, 式(4)中取最小值公式不会选择 0, 而是选择一个十分小的数值, 同时, p_n 也根据计算收敛性而定。

采用有限元方法对式(1)进行求解, 则固体位移场可表示为:

$$\mathbf{u} = \mathcal{H} \mathbf{u}_e, \quad \mathbf{u}_f = \bar{\mathcal{H}} \mathbf{u}_e \quad (5)$$

其中, \mathbf{u}_e 为节点位移。 \mathcal{H} 和 $\bar{\mathcal{H}}$ 分别为域单元和裂缝单元的形函数。

则应变与应力可表示为:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{u}_e, \quad \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D} \mathbf{B} \mathbf{u}_e \quad (6)$$

其中, \mathbf{B} 和 \mathbf{D} 分别为导数矩阵和刚度矩阵^[24]。如果考虑页岩为各向同性线弹性固体, 则^[27]:

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, E 和 ν 分别为弹性模量和泊松比。

将式(5)-(6)代入式(1)可得:

$$\pi_p = \sum \mathbf{u}_e^T \left\{ \frac{1}{2} \int_{\Omega_m} (\mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B}) d\Omega_m \mathbf{u}_e - \int_{\Gamma_\sigma} \bar{\mathcal{H}}^T \mathbf{T} d\Gamma - \int_{\Gamma_f^+} \bar{\mathcal{H}}^T \mathbf{T}_f^+ d\Gamma_f - \int_{\Gamma_f^-} \bar{\mathcal{H}}^T \mathbf{T}_f^- d\Gamma_f \right\} \quad (8)$$

对式(8)进行位移求导, 可得裂缝扩展过程中的岩石变形位移控制方程:

$$\mathbf{K}_I \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (9)$$

$$\mathbf{K}_I = \frac{1}{2} \int_{\Omega_m} (\mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B}) d\Omega_m \quad (10)$$

$$\mathbf{F} = \int_{\Gamma_\sigma} \bar{\mathbf{N}}^T \mathbf{T} d\Gamma + \int_{\Gamma_f^+} \bar{\mathbf{N}}_f^T \mathbf{T}_f^+ d\Gamma_f + \int_{\Gamma_f^-} \bar{\mathbf{N}}_f^T \mathbf{T}_f^- d\Gamma_f \quad (11)$$

本文计算中采用解析解获得裂缝长度和裂缝内压力随时间变化关系, 也即 \mathbf{T}_f^+ 、 \mathbf{T}_f^- 、 Γ_f 随时间变化, 将之代入式(9)即可进行裂缝扩展过程中的位移场求解, 随后采用式(6)即可获得裂缝扩展过程中的应变场。光纤上

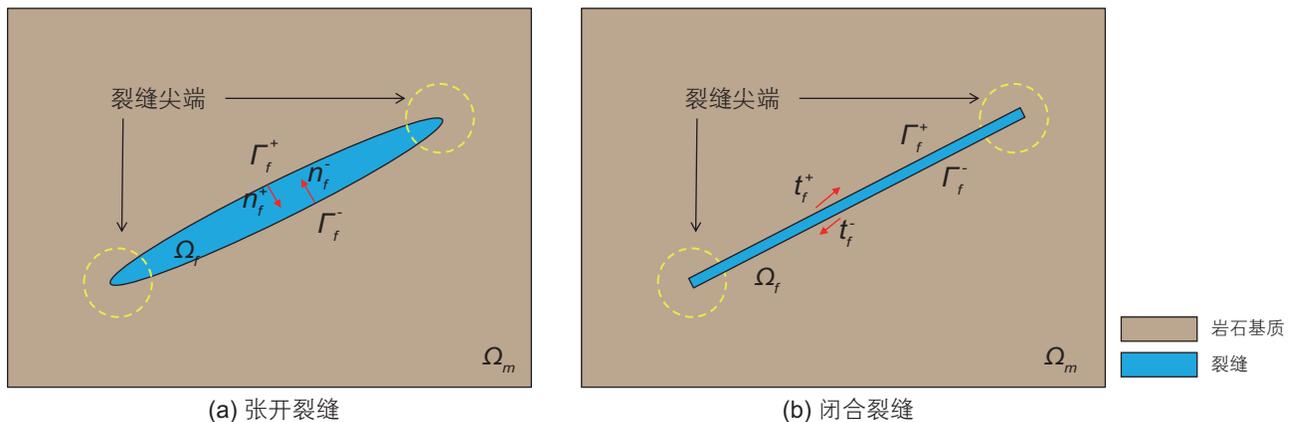


图 4 倾斜裂缝侧视图

Fig. 4 Side view of the tilt fracture

监测的应变率可采用式(12)进行计算:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{d\boldsymbol{\varepsilon}}{dt} = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1} - \boldsymbol{\varepsilon}_n}{t_{n+1} - t_n} \quad (12)$$

其中, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 为应变率。 $\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}_n$ 分别为相邻两个时刻的应变。 $t_{n+1} - t_n$ 为相邻两个时间的间隔。

2.2 数值模拟条件

在有限元计算过程中, 设置地层外边界为法向固定位移边界, 即:

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}_\Gamma = 0 \quad (12)$$

其中, \mathbf{n}_Γ 代表地层模型的表面单位法向量。水力裂缝表面受水压作用, 即式(2)。

图 5 给出了数值模拟计算过程中所采用的网格, 在不同位置置入光纤, 并在网格剖分时设置计算节点。在水力裂缝扩展过程中, 裂缝面的网格需要在每一步

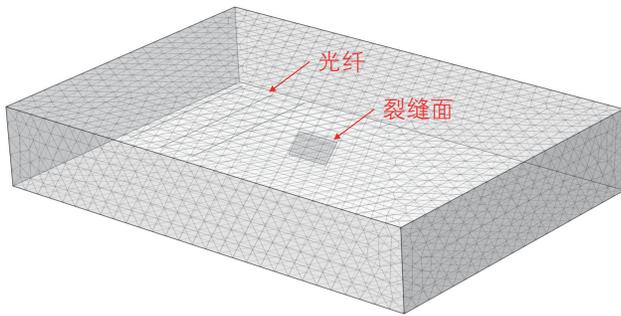


图 5 有限元计算网格

Fig. 5 Meshes of the FEM simulation

表 1 模型验证计算参数表

Table 1 Simulation parameters used in model validation

杨氏模量/GPa	泊松比	$\sigma_{h,min}$ /MPa	$\sigma_{H,max}$ /MPa	排量/(m ³ /min)	压裂时间/min	压裂液粘度/(mPa·s)	地层厚度/m
21.4	0.26	41.34	45.74	3.18	60	5	21.336

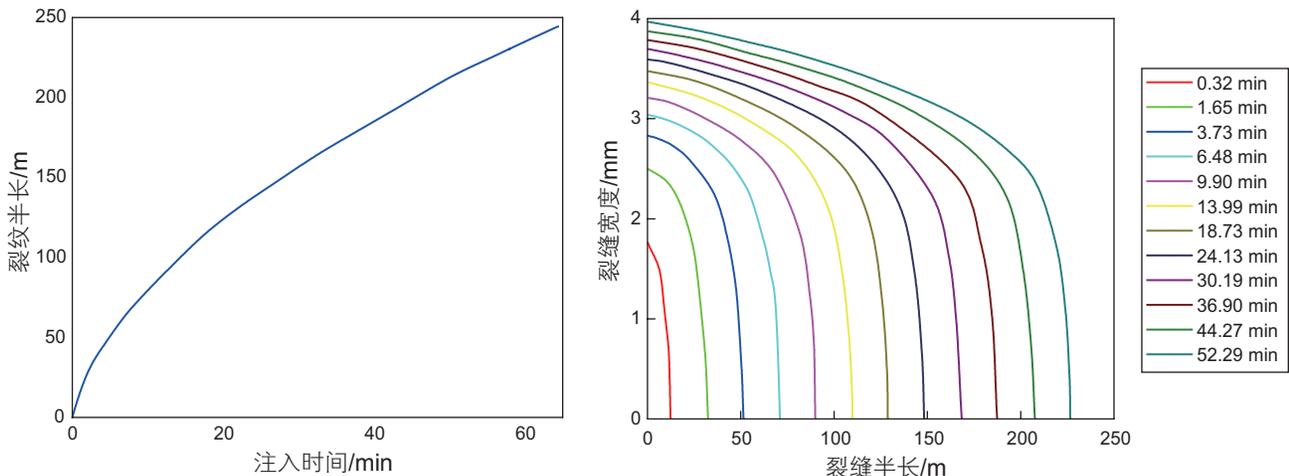


图 7 裂缝扩展长度和宽度与压裂时间的关系 (来自文献 [5])

Fig. 7 The relation among the fracture length, aperture and fracturing time (from reference [5])

计算过程中进行更新, 其他网格则保持不变。

3 模型验证

图 6 给出一口压裂水平井和三口监测水平井的俯视图, 考虑一口压裂井的一条垂直裂缝扩展, 与压裂井相距不同位置平行放置了三口监测井, 监测井井筒外部署光纤。随着压裂井裂缝扩展, 监测井 1~3 将依次监测到应变信号。相关计算参数均取自 Liu 等文章, 并列于表 1。

在裂缝扩展中, 裂缝长度和宽度随着压裂时间变化关系如图 7 所示, 将作为已知条件更新数值模拟式(11)中的 Γ_f 。在本文计算中, 裂缝宽度由裂缝面受到

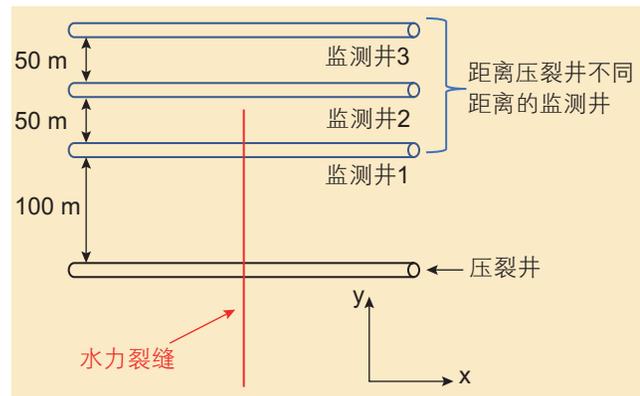


图 6 光纤监测示意图 (修改自文献 [5])

Fig. 6 Schematic diagram of the fiber optic monitoring (from reference [5])

的流体压力计算得到，因此本文模型在计算过程中并不需要设定裂缝宽度。

图 8~10 给出了压裂井裂缝扩展过程中，三口监测井监测到的位移、应变和应变率瀑布图。左侧为 Liu 等人的计算结果，右侧为本文模型的计算结果，可以

发现二者吻合程度较高，验证了本文模型的正确性。图 8~10 中的白色虚线对应的时间为水力裂缝与光纤相碰的时刻，可以发现，当水力裂缝击穿光纤时，光纤监测的位移瀑布图出现对称的图像，应变和应变率瀑布图均出现明显的“心形区”。随着监测井距离压裂井

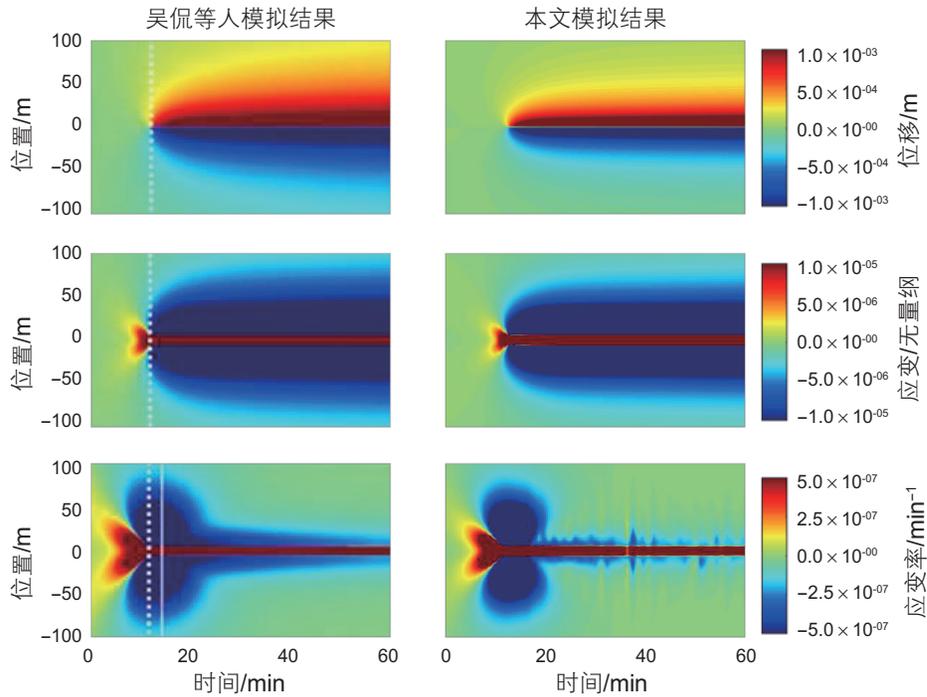


图 8 监测井 1 的位移、应变和应变率瀑布图

Fig. 8 Displacement, strain and strain rate waterfall plots of monitoring well 1

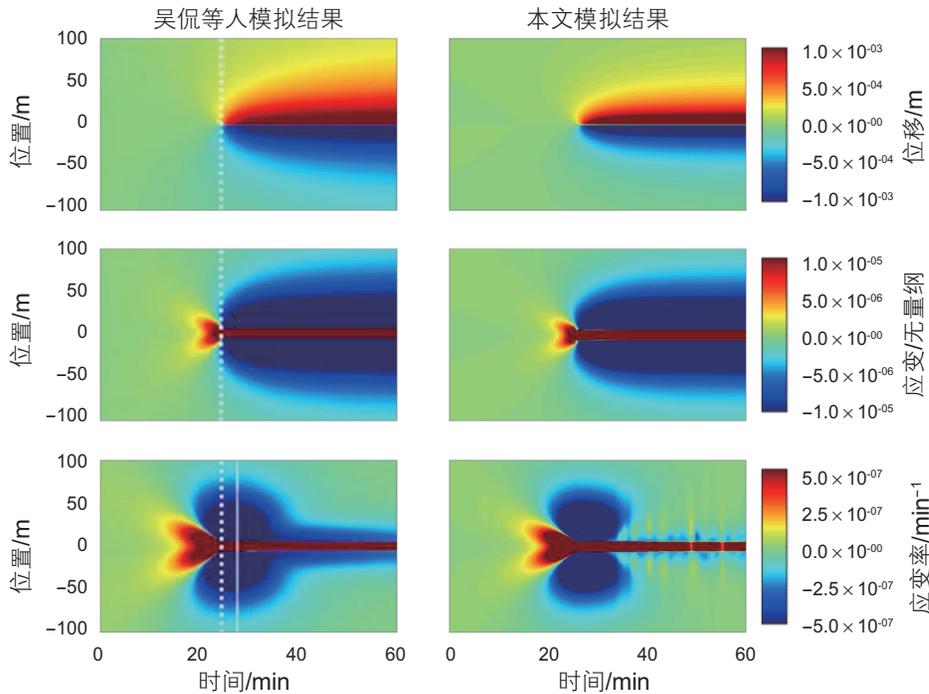


图 9 监测井 2 的位移、应变和应变率瀑布图

Fig. 9 Displacement, strain and strain rate waterfall plots of monitoring well 2

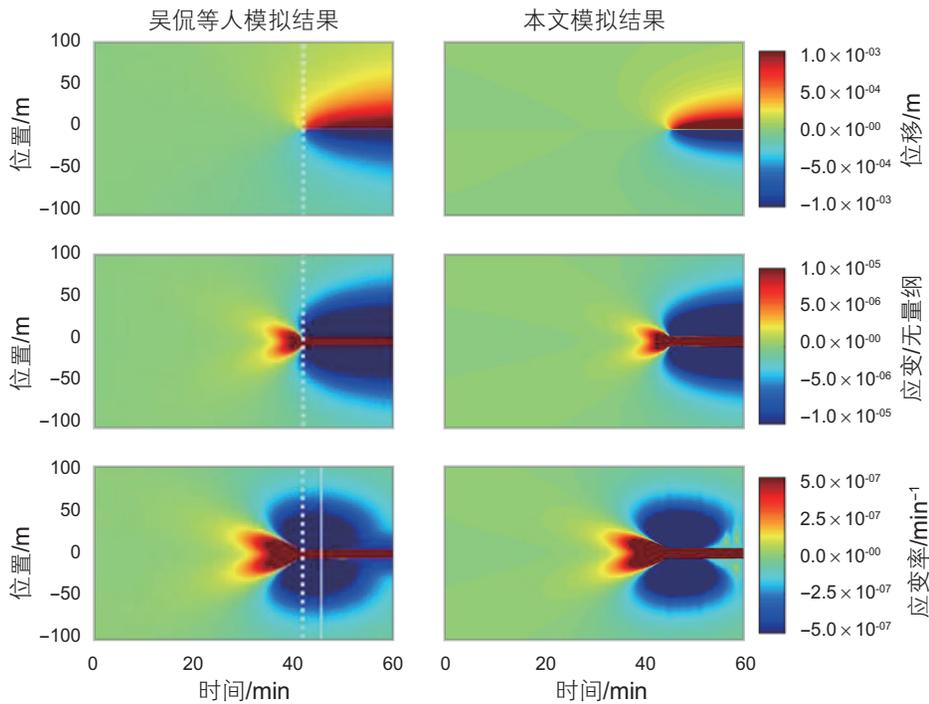


图 10 监测井 3 的位移、应变和应变率瀑布图

Fig. 10 Displacement, strain and strain rate waterfall plots of monitoring well 3

距离增大, 光纤监测到的特征信号(位移瀑布图的对称图像、应变瀑布图和应变率瀑布图的“心形区”)也随之在时间轴上后移, 但均发生在水力裂缝击中光纤时刻。由于图 6 中的裂缝为垂直缝, 因此, 光纤应变(应变率)瀑布图上“心形区”被认为是垂直缝击中光纤的特征信号^[28-29]。

4 不同倾角裂缝扩展过程中的应变特征分析

图 11 给出了裂缝长度、缝内净压力随时间变化曲线^[30], 将用作构造裂缝扩展过程中的裂缝几何形态和

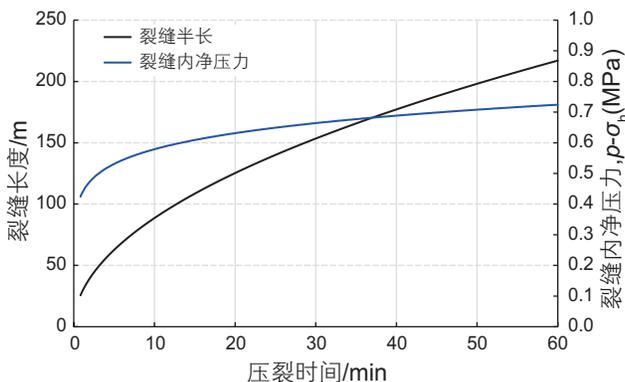


图 11 裂缝长度、缝内净压力与时间关系

Fig. 11 The relation among the fracture length, net pressure and fracturing time

裂缝面应力边界条件。表 2 给出了倾斜裂缝扩展模拟的计算参数, 参数值来源于四川涪陵某页岩气井。

4.1 不同倾斜角度裂缝的光纤应变和应变率特征

图 12 给出了裂缝倾角为 0~90°时的光纤应变瀑布图。由图 11 可以看出: 当裂缝倾角小于 15°时, 应变瀑布图中心最先出现红色椭圆信号, 此时光纤应变为正, 说明光纤中部处于受拉状态。随着水力裂缝扩展, 光纤中部拉应变增大, 且在中心上下位置出现对称的蓝色椭圆信号。在裂缝倾角处于 30~55°时, 光纤应变瀑布图出现对称的相反颜色椭圆, 说明光纤对称位置分别处于受拉和受压状态。当裂缝倾角为 60°时, 应变瀑布图的红色椭圆区域明显减小, 即应变为正的区城减小, 反映光纤受拉伸部分明显减小。当裂缝倾角超过 60°后, 随着水力裂缝扩展, 应变瀑布图首先出现一个红色条带, 之后出现 2 个蓝色椭圆, 说明光纤首先在中间位置发生拉伸, 逐渐转变为整体受压状态。

图 13 分别给出了裂缝倾角为 0~90°时的光纤应变率瀑布图。由图 13 可以看出: 当裂缝倾角为 0°时, 也即水平裂缝, 应变率瀑布图中心出现红色条带。当裂缝倾角为 15°时, 在裂缝扩展的前 12 min, 裂缝尖端距离光纤 60 m 之前, 应变瀑布图仅出现一条红色条带, 随后出现 2 条对称的红蓝条带。在裂缝倾角处于 30~55°时, 光纤应变率瀑布图出现两个对称的红蓝条

带。当裂缝倾角为 60° 时，光纤应变率瀑布图中的红色条带随着裂缝扩展逐渐变窄，同时出现一对新的红蓝条带。当裂缝倾角超过 60° 时，光纤应变率瀑布图

出现两个对称的蓝色条带。

对比图 12 和图 13 可知，光纤应变瀑布图出现对称的红蓝椭圆，以及应变率瀑布图出现对称的红

表 2 倾斜裂缝扩展计算参数表

Table 2 Simulation parameters used in inclined fracture propagation

参数类别	参数符号	参数值	参数含义
力学参数	E	21 GPa	弹性模量
	ν	0.32	泊松比
正断层	$\sigma_H / \sigma_h / \sigma_v$	45.74/41.34/55 MPa	最大水平主应力/最小水平主应力/上覆应力
走滑断层	$\sigma_H / \sigma_h / \sigma_v$	55/41.34/45.74 MPa	最大水平主应力/最小水平主应力/上覆应力
逆断层	$\sigma_H / \sigma_h / \sigma_v$	55/45.74/41.34 MPa	最大水平主应力/最小水平主应力/上覆应力

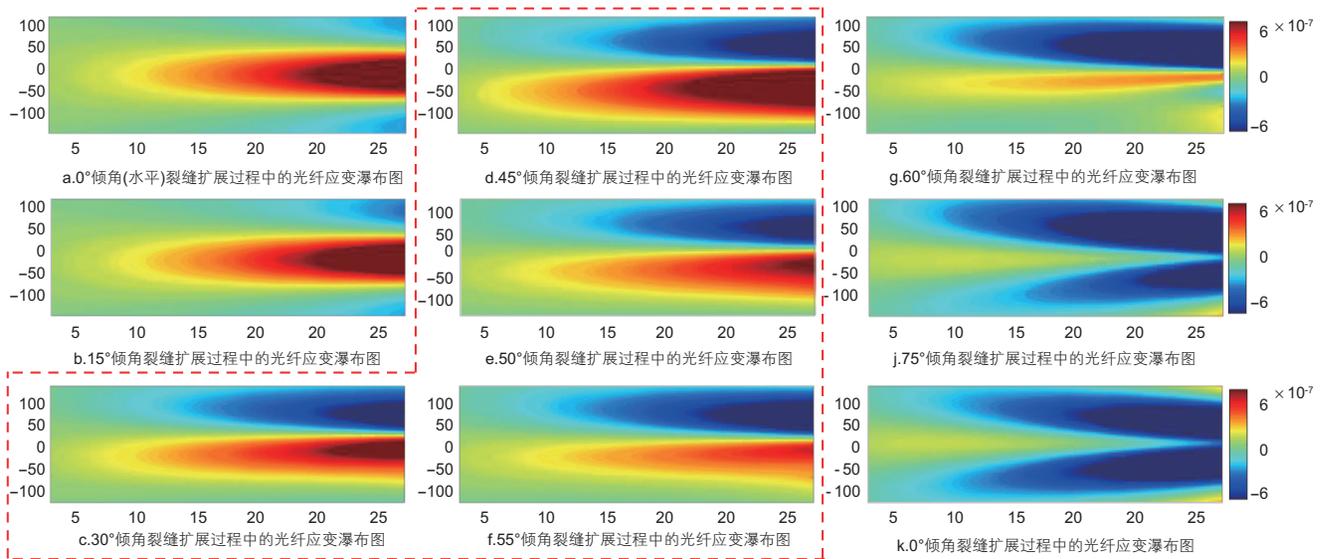


图 12 不同倾角裂缝扩展过程中的光纤应变瀑布图

Fig. 12 Fiber optic strain waterfalls during fracture propagation at different inclination angles

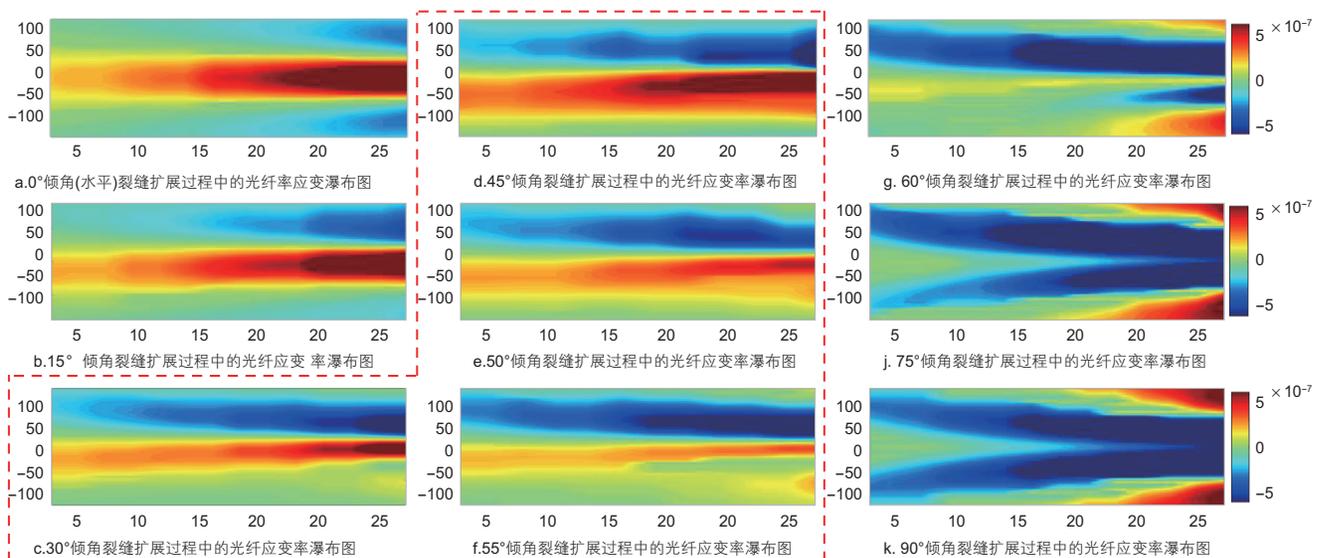


图 13 不同倾角裂缝扩展过程中的光纤应变率瀑布图

Fig. 13 Fiber optic strain rate waterfalls during fracture propagation at different inclination angles

蓝条带是倾斜裂缝扩展的特征信号，且椭圆或者条带的颜色和对称性能够显示倾斜裂缝的倾角范围。

4.2 不同倾斜方向水力裂缝的光纤监测信号特征

图 14 展示了倾角为 45° ，但倾斜方向不同的两个倾斜裂缝示意图。图 15 展示了两个不同倾斜方向的裂缝扩展过程中的应变瀑布图和应变率瀑布图。由图 15(a)和图 15(b)可知，当裂缝倾斜方向改变时，应变瀑布图中的红蓝椭圆位置颠倒，也即光纤发生拉伸和压缩的区域随着裂缝倾斜方向变化而改变。同时可由图 15(a)和图 15(b)发现：光纤发生拉伸的位置分布在与裂缝成锐角的方向，即当裂缝倾角为 45° 时，X轴左侧部分的光纤处于受拉状态，当裂缝倾角为 -45° 时，X轴右侧部分的光纤处于受拉状态。对比图 15(c)和图 15(d)可知：当裂缝倾斜方向改变时，应变率瀑布图的红蓝条带分布规律与应变瀑布图的红蓝椭圆分布规律相反。因此，光纤监测的应变和应变率瀑布图也能够反映出水力裂缝的倾斜方向。

4.3 不同高度倾斜水力裂缝的光纤监测信号特征

本节分析过程中仅改变裂缝的高度，其倾角始终

为 -45° ，裂缝垂向高度也随之变化。图 16(a)~(c)给出了不同高度裂缝扩展过程中的光纤应变瀑布图，可以发现：裂缝高度越大，应变瀑布图中的红色椭圆越宽，随着裂缝扩展，这个规律更加明显。图 16(d)~(f)给出了不同高度裂缝扩展过程中的应变率瀑布图，可以发现：随着裂缝高度增加，红色条带宽度增大，且随着裂缝扩展，此规律更加明显。因此可知，可以由应变瀑布图的红蓝椭圆和应变率瀑布图的红蓝条带宽度来定性分析水平井不同段的水力裂缝高度差异。

4.4 不同邻井监测距离下的光纤监测信号特征

本节分析了裂缝扩展 90 min 过程中的应变瀑布图和应变率瀑布图，裂缝倾角为 -45° ，裂缝扩展 90 min 后的总长度为 220 m。由图 17 可知，随着光纤监测距离的增加，光纤监测的信号强度减弱：监测距离每增加 100 m，应变和应变率减小一个数量级。由图 17(a)和图 16(d)可知，当邻井光纤距离裂缝距离为 150 m 时，裂缝在扩展 45 min 后击中光纤，应变瀑布图和应变率瀑布图出现多个心形区的组合。由图 8-图 10 可知，垂直裂缝击中光纤的应变瀑布图信号为单个心形区。因此，应变瀑布图和应变率瀑布图出现多个心形

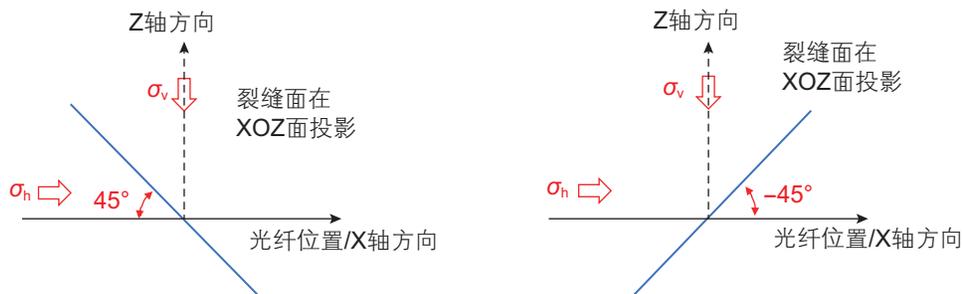


图 14 不同倾斜方向的 45° 倾角水力裂缝

Fig. 14 Hydraulic fractures at 45° inclination with different tilt directions

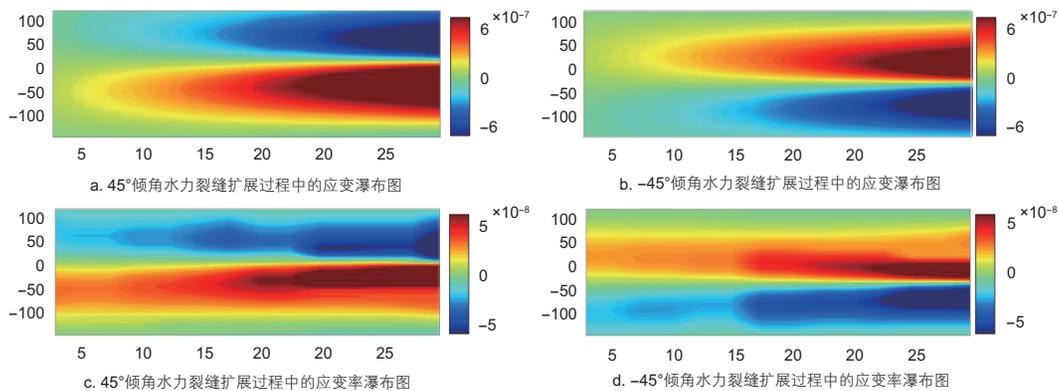


图 15 不同倾斜方向 45° 水力裂缝扩展过程中的光纤监测信号

Fig. 15 Fiber optic signals of hydraulic fractures at 45° inclination with different tilt directions

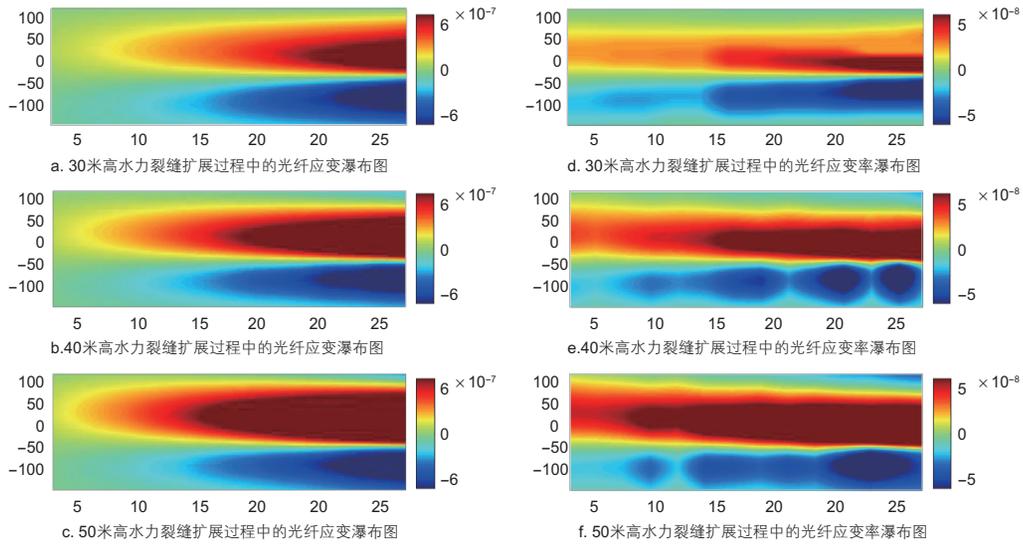


图 16 不同高度水力裂缝扩展过程中的光纤监测信号
 Fig. 16 Fiber optic signals of hydraulic fractures with different height

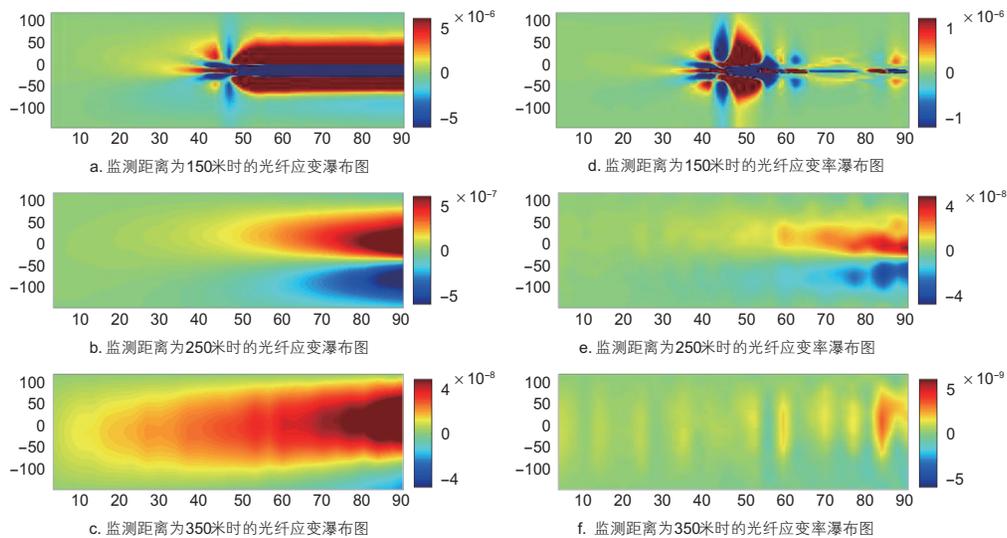


图 17 水力裂缝扩展过程中不同监测距离下的光纤监测信号
 Fig. 17 Fiber optic signals of hydraulic fractures with different monitoring distances

区可作为倾斜裂缝击中光纤的特征信号。

4.5 不同地应力状态下的光纤监测信号特征

本节分析了正断层和走滑断层应力条件下裂缝扩展过程中的光纤监测信号特征。正断层的应力参数为 $\sigma_v = 55 \text{ MPa}$, $\sigma_H = 45.74 \text{ MPa}$, $\sigma_h = 41.34 \text{ MPa}$, 走滑断层的应力参数为 $\sigma_H = 55 \text{ MPa}$, $\sigma_h = 41.34 \text{ MPa}$, $\sigma_v = 45.74 \text{ MPa}$, 逆断层的应力参数为 $\sigma_H = 55 \text{ MPa}$, $\sigma_h = 45.74 \text{ MPa}$, $\sigma_v = 41.34 \text{ MPa}$ 。裂缝倾角为 -45° 和 -30° , 如图 18 所示, 裂缝高度为 30 m。

由图 19 可知, 水力裂缝在不同应力状态地层中扩展的光纤监测信号具有显著差别: 随着裂缝扩展, 正

断层的应变瀑布图和应变率瀑布图均出现对称的拉压特征(红蓝应变椭圆或应变率条带), 走滑断层和逆断层的应变瀑布图中拉伸信号特征远小于压缩信号特征, 且应变率瀑布图交叉出现多个尺度不一的不对称红蓝条带。

由图 20 可知, 水力裂缝在不同应力状态地层中扩展的光纤监测信号特征相同: 应变瀑布图呈现对称的红蓝应变椭圆和应变率条带。对比图 20(a)、20(b)和 20(c)中的红色椭圆可知, 水力裂缝在正断层地层中扩展时的光纤监测应变瀑布图信号最为清晰, 拉伸信号特征最强。水力裂缝在逆断层地层中扩展时, 光纤监测应变瀑布图中的拉伸信号特征最弱。对比图 20(d)、

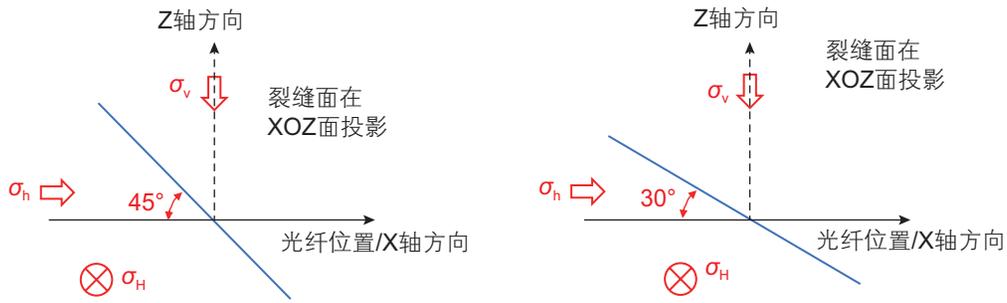


图 18 -30° 和 -45° 倾角裂缝
 Fig. 18 Inclined fracture with -30° and -45° angles

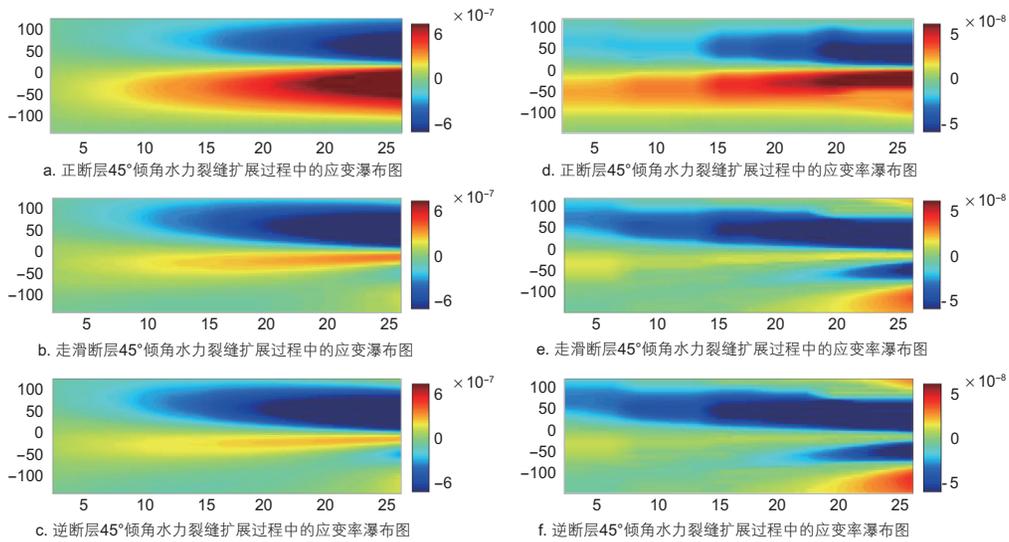


图 19 不同地应力状态下 -45° 倾角水力裂缝扩展过程中的光纤监测信号
 Fig. 19 Fiber optic signals of hydraulic fractures with -45° angle under different stress state

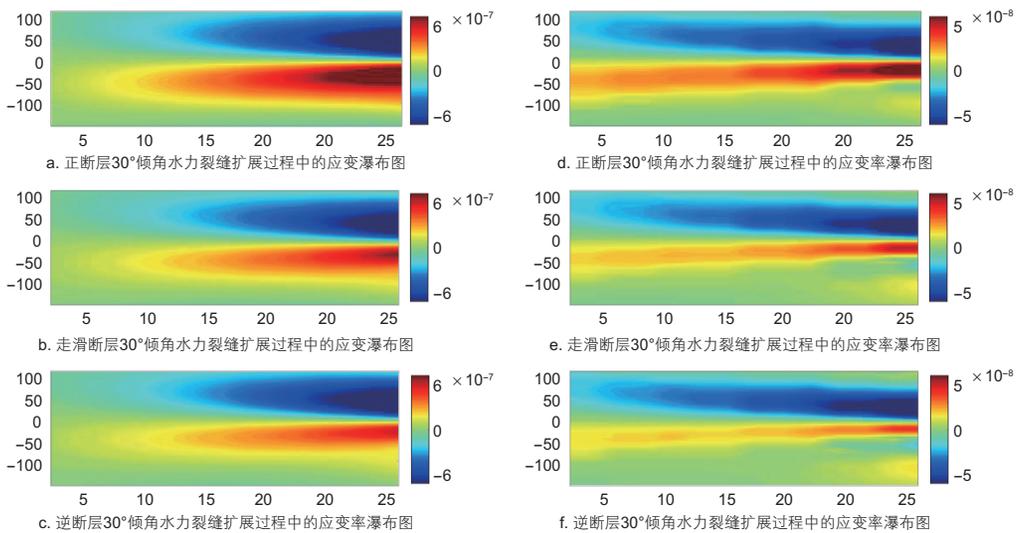


图 20 不同地应力状态下 -30° 倾角水力裂缝扩展过程中的光纤监测信号
 Fig. 20 Fiber optic signals of hydraulic fractures with -30° angle under different stress state

20(e) 和 20(f) 可知，随着地层应力状态变化，正断层地层中的裂缝扩展应变率瀑布图中的红色条带最宽，

信号强度最大，逆断层地层中的裂缝扩展应变率瀑布图中的红色条带最窄，信号强度最弱。

总结图 19 和图 20 结果分析可知：水力裂缝在不同地应力状态的储层中扩展时，应变率瀑布图的红蓝条带特征与水力裂缝倾角和地层应力状态密切相关，可通过应变率瀑布图判断水力裂缝倾角和局部地应力状态。

5 结论

本文建立了三维倾斜裂缝扩展力学模型，考虑裂缝扩展过程中的拉伸和剪切力学行为，并采用有限元方法进行求解，分析了倾斜水力裂缝扩展过程中的邻井光纤监测信号特征，获得相关结论如下：

(1)在倾斜裂缝击中光纤前，当裂缝倾角处于 30~55° 之间时，光纤应变瀑布图出现对称的红蓝椭圆，同时应变率瀑布图出现对称的红蓝条带特征，应变率瀑布图中的红蓝条带对称性和数量能够反映裂缝倾角的范围。当倾斜裂缝击中光纤时，应变瀑布图和应变率瀑布图出现多个心形区，可作为倾斜裂缝击中光纤的特征信号。

(2)相比于走滑断层和逆断层，水力裂缝在正断层

地层中扩展时，光纤监测的应变椭圆和应变率条带信号更加明显，表现为信号强度增大和对称性增强。当水力裂缝倾角改变时，地层应力状态对光纤监测信号的影响规律发生变化，可通过应变率瀑布图判断水力裂缝倾角和局部地应力状态。

(3)在同样倾角下，当裂缝倾斜方向改变时，水力裂缝扩展过程中的应变与应变率瀑布图信号特征刚好相反，且由光纤的拉压特征分析可以得到水力裂缝的倾斜方向。

(4)随着水力裂缝高度增加，光纤监测的信号强度增加，应变率瀑布图中的条带宽度增加，因此，对于水平井而言，可以通过进一步细化本文研究，建立水力裂缝高度与应变瀑布图中特征条带宽度的关系，进而获得不同段水力裂缝高度的定量解释模型。

(5)随着监测光纤距离水平井的距离增大，光纤监测的信号强度快速衰减，本文选定的地层参数条件下，监测距离每增加 100 m，光纤监测的信号强度衰减 1 个数量级，因此，在设计光纤监测的位置时，必须考虑光纤的空间分辨率。

参考文献

- [1] 隋微波, 温长云, 孙文常, 等. 水力压裂分布式光纤传感联合监测技术研究进展[J]. 天然气工业, 2023, 43(02): 87-103. [SUI W B, WEN C Y, SUN W C, et al. Joint application of distributed optical fiber sensing technologies for hydraulic fracturing monitoring[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(02): 87-103.]
- [2] 隋微波, 刘荣全, 崔凯. 水力压裂分布式光纤声波传感监测的应用与研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51(04): 371-387. [SUI W B, LIU R Q, CUI K. Application and research progress of distributed optical fiber acoustic sensing monitoring for hydraulic fracturing[J]. Scientia Sinica(Technologica), 2021, 51(04): 371-387.]
- [3] JACOBS T. Hess research project points to fewer wells and passive producers that “harvest” offset fractures[J]. Journal of Petroleum Technology, 2022, 74(4): 32-39.
- [4] JIN G, ROY B. Hydraulic-fracture geometry characterization using low-frequency DAS signal[J]. The Leading Edge, 2017, 36(12): 975-980.
- [5] LIU Y, WU K, JIN G, et al. Rock deformation and strain-rate characterization during hydraulic fracturing treatments: Insights for interpretation of low-frequency distributed acoustic-sensing signals[J]. SPE Journal, 2020, 25(5): 2251-2264.
- [6] LIU Y, WU K, JIN G, et al. Hydraulic fracture modeling of fracture-induced strain variation measured by low-frequency distributed acoustic sensing (LF-DAS) along offset wells[C]. ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium(2020). ARMA, 2020: ARMA-2020-1426.
- [7] LIU Y, WU K, JIN G, et al. Strain and strain-rate responses measured by LF-DAS and corresponding features for fracture-hit detection during multiple-fracture propagation in unconventional reservoirs[C]. Unconventional Resources Technology Conference(2020). URTEC, 2020: 1134-1152.
- [8] 陈铭, 郭天魁, 胥云, 等. 水平井压裂多裂缝扩展诱发光纤应变演化机理[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 183-193. [CHEN M, GUO T K, XU Y, et al. Evolution mechanism of optical fiber strain induced by multi-fracture growth during fracturing in horizontal wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 183-193.]
- [9] LEGGETT S, REID T, ZHU D, et al. Experimental investigation of low-frequency distributed acoustic strain-rate responses to propagating fractures[J]. SPE Journal, 2022, 27(06): 3814-3828.
- [10] LEGGETT S, KERR E, ZHU D, et al. Rapid estimations of dynamic hydraulic fracture fronts from cross-well low-frequency distributed

- acoustic sensing strain-rate measurements[C]. Unconventional Resources Technology Conference(2022). URTEC, 2022: 241–260.
- [11] CHEN M, TANG J, ZHU D, et al. Classification and localization of fracture-hit events in low-frequency distributed acoustic sensing strain rate with convolutional neural networks[J]. SPE Journal, 2022, 27(02): 1341–1353.
- [12] SRINIVASAN A, LIU Y, WU K, et al. Analysis of strain responses in vertical monitoring wells for low-frequency distributed acoustic sensing[C]. ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium(2022). ARMA, 2022: ARMA–2022–0263.
- [13] SRINIVASAN A, LIU Y, WU K, et al. Geomechanical modeling of fracture-induced vertical strain measured by distributed fiber-optic strain sensing[J]. SPE Production & Operations, 2023: 1–15.
- [14] SHAHRI M, TUCKER A, RICE C, et al. High fidelity fibre-optic observations and resultant fracture modeling in support of planarity[C]. SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition(2021). OnePetro, 2021.
- [15] MCCLURE M, KANG C, MEDAM S, et al. ResFrac technical writeup[J]. arXiv preprint arXiv: 1804.02092, 2018.
- [16] 石林, 史臻, 田中兰, 等. 中石油页岩气开发中的几个岩石力学问题[J]. 石油科学通报, 2019, 4(03): 223–232. [SHI L, SHI C, TIAN Z L, et al. Several rock mechanics problems in the development of shale gas in PetroChina[J]. Petroleum Science Bulletin, 2019, 4(03): 223–232.]
- [17] 石林, 张鲲鹏, 慕立俊. 页岩油储层压裂改造技术问题的讨论[J]. 石油科学通报, 2020, 5(04): 496–511. [SHI L, ZHANG K P, MU L J. Discussion of hydraulic fracturing technical issues in shale oil reservoirs[J]. Petroleum Science Bulletin, 2020, 5(04): 496–511.]
- [18] 刘星, 金衍, 林伯韬, 等. 利用微地震事件重构三维缝网[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(01): 102–111+8–9. [LIU X, JIN Y, LIN B T, et al. A 3D fracture network reconstruction method based on microseismic events[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(01): 102–111+8–9.]
- [19] 刘星. 基于微地震监测的深层页岩压裂缝网表征方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022. [LIU X. Study on characterization method of complex fracture network of deep shale after fracturing based on microseismic monitoring[D]. Beijing: China University of Petroleum, Beijing, 2022.]
- [20] 方正, 陈勉, 王溯, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷页岩水平井水力压裂裂缝形态[J]. 新疆石油地质, 2024, 45(01): 72–80. [FANG Z, CHEN M, WANG S, et al. Geometry of hydraulic fractures in fractured horizontal wells in shale reservoirs of Jimsar sag, Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2024, 45(01): 72–80.]
- [21] RATNAYAKE R, GHASSEMI A. Modeling of fiber optic strain responses to shear deformation of fractures[J]. Energies, 2024, 17(9): 2142.
- [22] 朱海燕, 宋宇家, 唐焯赫. 页岩气储层四维地应力演化及加密井复杂裂缝扩展研究进展[J]. 石油科学通报, 2021, 03: 396–416. [ZHU H Y, SONG Y J, TANG X H. Research progress on 4-dimensional stress evolution and complex fracture propagation of infill wells in shale gas reservoirs[J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 03: 396–416.]
- [23] 史臻, 林伯韬. 页岩储层压裂裂缝扩展规律及影响因素研究探讨[J]. 石油科学通报, 2021, 01: 92–113. [SHI C, LIN B T. Principles and influencing factors for shale formations[J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 01: 92–113.]
- [24] WEI S M, KAO J W, JIN Y, et al. A discontinuous discrete fracture model for coupled flow and geomechanics based on FEM[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 204(3): 108677.
- [25] 韦世明, 金衍, 考佳玮, 等. 钻井-压裂-生产全过程储层应力演化与加密井压裂优化[J]. 石油学报, 2022, 43(09): 1305–1314+1324. [WEI S M, JIN Y, KAO J W, et al. Reservoir stress evolution and fracture optimization of infill wells during the drilling-fracturing-production process[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(09): 1305–1314+1324.]
- [26] WEI S M, XIA Y, JIN Y, et al. Production induced fracture closure of deep shale gas well under thermo-hydro-mechanical conditions[J]. Petroleum Science, 2024, 21(3): 1796–1813.
- [27] 张亚洲, 韦世明, 金衍, 等. 陆相页岩油藏三维空间应力场动态演化规律[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(S1): 163–171+212. [ZHANG Y Z, WEI S M, JIN Y, et al. 3D dynamic stress evolution of the continental shale oil reservoirs[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(S1): 163–171+212.]
- [28] WANG C, MA Y, EATON D, et al. Hydraulic fracture monitoring using distributed acoustic sensing: A case study using dip-in fiber[J]. Unconventional Resources Technology Conference(2022). URTEC, 2022: 1262–1278.
- [29] BOHN R. Measuring fracture induced stress shadow using fiber optic sensing and its implications on fracture stimulation design. Unconventional Resources Technology Conference(2022). URTEC, 2022: 261–280.
- [30] 刘广涛. 对比研究KGD、PKN与改进的P3D模型[J]. 应用数学进展, 2023, 12(11): 4570–4579. [LIU G T. A comparative analysis of KGD, PKN, and a modified P3D model[J]. Advances in Applied Mathematics, 2023, 12(11): 4570–4579.]