

文章编号: 0253-2697(2024)08-1282-14 DOI:10.7623/syxb202408010

基于裂缝前缘邻井光纤应变的压裂裂缝参数解释方法

陈 铭¹ 郭天魁¹ 翁定为² 张源航¹ 胡尊鹏¹ 修乃岭² 唐 金²

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院 山东青岛 266580; 2. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘要:利用裂缝前缘光纤应变进行裂缝参数的准确高效解释,是目前邻井光纤应变技术实现大规模推广应用的关键。基于三维位移不连续边界元建立光纤应变计算方法,并构建了基于裂缝前缘光纤应变的裂缝参数反演模型;基于光纤应变模型,计算分析了裂缝前缘光纤应变分布随裂缝参数的变化特征,建立了峰值应变及零应变位置与裂缝参数的关系式;以裂缝前缘光纤应变的正演结果为人工合成监测数据,论证了裂缝前缘光纤应变反演裂缝参数的可行性;利用北美地区水力压裂试验场光纤应变监测结果,进行了基于裂缝前缘光纤应变的实际井裂缝参数解释。研究结果表明:①裂缝前缘的光纤应变与裂缝长度、高度和宽度分布均相关,对缝长最为敏感;②零应变位置对缝高较为敏感,而峰值应变位置对缝高不敏感,通过峰值应变位置可对缝长进行快速解释;③内点法可有效求解该反演问题,计算效率高,适合工程应用;④基于裂缝前缘的邻井光纤应变可有效解释缝长变化,而缝高、缝宽及缝宽分布具有较强多解性。

关键词:光纤应变;裂缝诊断;反演模型;裂缝参数解释;可解释性

中图分类号:TE357.1

文献标识码:A

Interpretation method of fracturing fracture parameters based on optical fiber strain at the front margin of fracture in adjacent wells

Chen Ming¹ Guo Tiankui¹ Weng Dingwei² Zhang Yuanhang¹ Hu Zunpeng¹ Xiu Nailing² Tang Jin²

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Shandong Qingdao 266580, China;
2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: Accurate and efficient interpretation of fracture parameters using optical fiber strain measurements at the fracture front is crucial for the broad application of optical fiber strain technology in adjacent wells. For this purpose, a method for calculating optical fiber strain was established based on three-dimensional displacement discontinuous boundary elements, and a fracture parameter inversion model based on optical fiber strain at the front margin of fracture was built. Further, based on the optical fiber strain model, calculation and analysis were performed for the variation characteristics of the distribution of optical fiber strain at the front margin of fracture with fracture parameters, and the relational expressions between the peak strain and zero strain positions and the fracture parameters were established. Next, the feasibility of inverting fracture parameters by optical fiber strain at the front margin of fracture was demonstrated using the forward modeling results of optical fiber strain as the artificially synthesized monitoring data. Finally, using the optical fiber strain monitoring results from the North American hydraulic fracturing test site, the actual well fracture parameters were interpreted based on optical fiber strain at the front margin of fracture. The research shows as follows: (1) The optical fiber strain at the front margin of fracture is related to the distribution of fracture length, height, and width, and is most sensitive to fracture length. (2) The zero strain position is sensitive to fracture height, while the peak strain position is not sensitive to fracture height. The fracture length can be interpreted quickly by the peak strain position. (3) The interior point method can effectively solve the inversion problem, characterized with high computational efficiency, and is suitable for engineering application. (4) The optical fiber strain in adjacent wells based on the front margin of fracture can effectively interpret the variation of fracture length, while the distribution of fracture height, fracture width, and fracture width has high multiplicity of solutions.

Key words: optical fiber strain; fracture diagnosis; inversion model; interpretation of fracture parameters; interpretability

引用:陈铭,郭天魁,翁定为,张源航,胡尊鹏,修乃岭,唐金. 基于裂缝前缘邻井光纤应变的压裂裂缝参数解释方法[J]. 石油学报, 2024, 45(8): 1282-1295, 1308.

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目“基于分布式光纤应变的水平井压裂多裂缝扩展形态诊断机理研究”(No. 52104060)和山东省青年科学基金项目“水平井压裂多缝扩展诱发光纤应变演化机制与裂缝诊断方法研究”(ZR2021QE015)资助。

第一作者:陈 铭,男,1990年3月生,2020年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油大学(华东)石油工程学院副教授,主要从事水力压裂裂缝扩展数值模拟和裂缝诊断方面的研究。Email:chenmingfrac@163.com

通信作者:郭天魁,男,1984年7月生,2013年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油大学(华东)石油工程学院教授,主要从事储层压裂改造理论与技术方面的研究。Email:guotiankui@126.com

Cite : CHEN Ming, GUO Tiankui, WENG Dingwei, ZHANG Yuanhang, HU Zunpeng, XIU Nailing, TANG Jin. Interpretation method of fracturing fracture parameters based on optical fiber strain at the front margin of fracture in adjacent wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(8): 1282-1295, 1308.

压裂设计和施工决策的核心依据是裂缝形态,而裂缝诊断技术是获取裂缝真实形态的主要途径^[1-3]。邻井光纤低频振动监测(LF-DAS),又称邻井光纤应变监测,是裂缝形态精细诊断的新兴技术^[4-6]。该技术可清晰识别井间裂缝窜扰、多簇裂缝非均匀扩展,在水平井压裂裂缝诊断中发挥重要作用^[7-9]。

邻井光纤应变利用裂缝扩展诱发的光纤应变进行裂缝诊断。前期学者建立了裂缝扩展诱发邻井光纤应变的正演模型,包括基于二维裂缝模型^[10-11]、拟三维裂缝模型^[12-14]和平面三维裂缝模型^[15]的光纤应变正演模型。通过光纤应变正演可获得裂缝扩展过程光纤应变的响应规律,但如何利用邻井光纤应变反演裂缝参数,尤其是利用裂缝碰到光纤前的光纤应变解释裂缝参数,仍是该技术亟待解决的关键问题^[8]。

裂缝碰到光纤后信号迅速增强,邻井光纤应变出现“汇聚条带”,可清晰识别压裂时刻和位置,进而评估裂缝形态并指导多簇压裂施工设计^[16-17];裂缝延伸到邻井光纤之前的光纤应变(简称裂缝前缘光纤应变)同样蕴含裂缝扩展的重要信息,如何通过这段应变数据进行裂缝诊断,目前严重缺少相关研究^[18-20]。Leggett等^[18]通过裂缝前缘光纤应变瀑布图中的零应变位置特征,建立了基于零应变的裂缝半径识别方法,并进一步将圆形裂缝零应变位置校正到矩形裂缝^[19]。该方法需要对零应变位置进行准确的判断,而受限于零应变位置的理想模型假定,该方法在多裂缝方面适用性不足^[20]。Liu等^[21]利用二维裂缝位移不连续方法,基于裂缝碰到光纤时的应变信号,对裂缝长度和面积进行了反演,但未针对反演方法的适用性、参数多解性进行

深入研究。目前邻井光纤应变的裂缝参数解释还处于发展阶段,以上相关研究并没有回答裂缝前缘的光纤应变可解释哪些裂缝参数、是否具有多解释性等问题。因此,亟需邻井光纤应变理论分析、反演方法和参数可解释性的研究,从而为现场工程师解释邻井光纤应变提供技术依据。

笔者建立了三维水力裂缝诱发光纤应变的理论模型和基于裂缝前缘光纤应变的裂缝参数反演方法;然后开展了光纤应变与裂缝参数的相关性分析,明确了光纤应变对裂缝参数的敏感性,并建立了特征应变(零应变与峰值应变)位置与裂缝参数的相关式;进而基于裂缝扩展诱发光纤应变正演合成数据,讨论了反演的可行性;最后通过现场数据进行了实际井光纤应变的解释分析。研究和解释方法可为油田现场解释光纤应变提供理论和技术参考。

1 邻井光纤应变理论模型

1.1 裂缝诱导应变模型

裂缝和光纤的几何模型如图 1 所示。裂缝为长 $2L$ (半长 L)、高 H 的矩形缝,监测井距离压裂井的水平距离为 S_{well} 、纵向距离为 d_{well} ;裂缝中心点为坐标原点, x 、 y 、 z 坐标分别沿缝长、缝高和井筒轴向;采用三维位移不连续法(3D DDM)进行裂缝诱导应力场计算,裂缝单元尺寸为 $\Delta x \times \Delta y$ (图 1)。

裂缝张开(法向位移不连续)会在地层产生应力/应变,与地层耦合良好的光纤可感测地层的变形,从而诊断裂缝扩展动态。将水力裂缝离散为 N 个矩形单元,根据无限大空间位移不连续量基本解^[22](点源解),

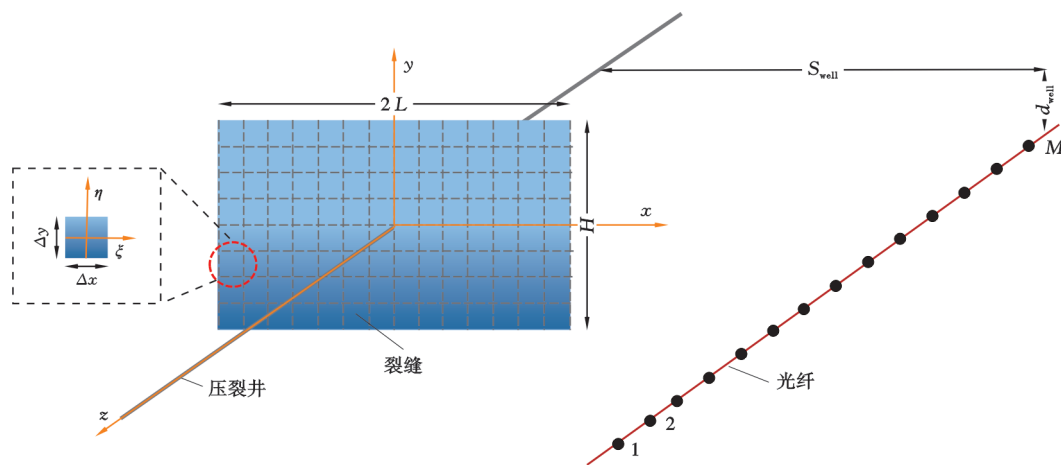


图 1 光纤应变计算模型的几何示意

Fig. 1 Geometric diagram of optical fiber strain computation model

叠加每个单元的位移不连续基本解,即得到裂缝在光纤所在位置产生的应力及光纤轴向位移:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \frac{E}{4\pi(1-\nu)} \sum_{j=1}^N [I_{zz} + (1-2\nu)I_{yy} - zI_{xxz}] \omega_j \\ \sigma_{yy} = \frac{E}{4\pi(1-\nu)} \sum_{j=1}^N [I_{zz} + (1-2\nu)I_{xx} - zI_{yyz}] \omega_j \\ \sigma_{zz} = \frac{E}{4\pi(1-\nu)} \sum_{j=1}^N (I_{zz} - zI_{zzz}) \omega_j \\ u_{zz} = \frac{1}{8\pi(1-\nu)} \sum_{j=1}^N [2(1-\nu)I_z - zI_{zz}] \omega_j \end{cases} \quad (1)$$

式中的 $I_z, I_{xx}, I_{zzz}, I_{yy}, I_{xxz}, I_{yyz}$ 为核函数^[19],具体形式为:

$$\begin{cases} I_z = -\arctan\left(\frac{\bar{x} \cdot \bar{y}}{rz}\right), I_{yy} = \frac{\bar{y}}{r(r+\bar{x})} \\ I_{xx} = \frac{\bar{x} \cdot \bar{y}(\bar{x}^2 + r^2)}{r(\bar{y}^2 + \bar{x}^2)(\bar{y}^2 + z^2)} \\ I_{xxz} = -\frac{\bar{x}z(2r+\bar{y})}{r^3(r+\bar{y})^2}, I_{yyz} = -\frac{\bar{y}z(2r+\bar{x})}{r^3(r+\bar{x})^2} \\ I_{zzz} = -z\bar{x} \cdot \bar{y} \frac{(\bar{z}^2 + \bar{x}^2)^2(\bar{z}^2 + \bar{y}^2 + 2r^2) + (\bar{z}^2 + \bar{y}^2)^2(\bar{z}^2 + \bar{x}^2 + 2r^2)}{r^3(\bar{z}^2 + \bar{x}^2)^2(\bar{y}^2 + \bar{z}^2)^2} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\bar{x} = x - \xi, \bar{y} = y - \eta; r$ 和算符 $\|$ 分别为:

$$r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2} \quad (3)$$

$$I(\xi, \eta) \| = I(a, b) - I(a, -b) - I(-a, b) + I(-a, -b) \quad (4)$$

式中, $a = 0.5\Delta x, b = 0.5\Delta y$ 。

1.2 光纤应变计算方法

邻井低频光纤声监测获取的光纤相位变化与光纤轴向位移呈正比,可通过相邻测点的相位差得到光纤应变。假设光纤与地层耦合良好,裂缝扩展诱发的岩石位移即为光纤位移^[1]。光纤应变计算公式为^[1,23]:

$$\epsilon_f = \frac{u_{zz}(z + L_g/2) - u_{zz}(z - L_g/2)}{L_g} \quad (5)$$

裂缝碰到光纤之前,光纤沿程监测到的位移及应变连续分布,因此裂缝前缘的光纤应变也可通过线弹性本构方程计算:

$$\epsilon_f = \frac{\sigma_{zz}}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (6)$$

式(5)表明,光纤应变是裂缝形态、岩石泊松比的函数,与杨氏模量无关;尽管式(6)出现了杨氏模量。而由式(1)可知,应力与杨氏模量 E 呈正比,因此对于一定几何尺寸的裂缝,通过式(6)计算而来的应变同样与杨氏模量无关。此外,由 Sneddon 理论解^[24] 也可知,裂缝诱导应变是泊松比、裂缝形态参数和缝内压力的函数,与杨氏模量无关。因此,在光纤应变反演中可

不考虑杨氏模量的影响。决定应变大小的参数还有泊松比,但标准岩心力学实验可以方便获取该参数,因此光纤应变分析的不确定量主要是裂缝几何参数。

裂缝几何参数包括裂缝轮廓(缝长和缝高)和缝宽分布。对于一定几何尺寸的裂缝,离散为 N 个单元后,每个单元均存在未知(待反演)参数,即为 N 维参数反演问题,存在两个难题:①计算量巨大,工程实用性不足;②高维参数拟合的不确定性较大。为简化反演计算量和提高反演的确定性,对缝内宽度进行简化处理。根据 PKN 裂缝解析解^[25-26],缝内宽度分布可近似为:

$$\omega = \omega_{in}(1-x/L)^n \sqrt{1-(2y/H)^2}, 0 \leq n \leq 1 \quad (7)$$

当 $n=0$ 时,为韧性主导的裂缝^[23];当 $n=1/3$ 时,为黏性和存储主导的裂缝^[26];当 $n=3/8$ 时,为黏性和滤失主导的裂缝^[26]。式(7)是缝宽分布的一种形式,实际压裂裂缝的缝宽可能具有多种形式^[27],因此在反演时,可设计其他形式的缝宽分布,从而获得更为匹配的应变反演结果。

1.3 基于裂缝前缘光纤应变的裂缝参数反演模型

反演本质上为最优化问题^[28]。基于裂缝前缘光纤应变模型,采用一定裂缝参数计算光纤沿程的应变,并与实际监测值比较,当模型结果与监测结果在误差范围以内时,则得到该条件的裂缝参数反演结果。

1.1 节和 1.2 节阐述了光纤应变的理论计算方法,并将待解决的裂缝参数简化为缝长、缝高、入口缝宽和宽度分布指数 4 个参数。因此,基于裂缝前缘光纤应变的裂缝参数反演模型为:

$$\begin{aligned} \min f(L, H, \omega_{in}, n, z_{fiber}) = & \left\| \frac{\epsilon_f(L, H, \omega_{in}, n, z_{fiber}) - \epsilon_{meas}(z_{fiber})}{\epsilon_{meas}(z_{fiber})} \right\|_2 \\ \text{s. t.} & \quad 0 < L \leq S_{well} \\ & \quad 0 < H \leq H_{max} \\ & \quad 0 < \omega_{in} < \omega_{max} \\ & \quad 0 \leq n \leq 1 \end{aligned} \quad (8)$$

其中,最大缝高和缝宽可通过经验或其他监测手段确定,一般缝宽在微米到厘米的量级范围,缝高在几十到几百米的量级范围。

式(8)即为本文所述的光纤应变反演模型,其中裂缝前缘的光纤应变 ϵ_f 计算采用式(5)和式(1)、 ϵ_f 计算中的缝宽分布采用式(7)。由于反演量较少,可采用基于梯度的内点法进行数值求解,当目标函数数值接近 0 时(本文取 10^{-12}),得到问题的最优解^[28]。基于梯度的内点法为带约束最优化求解的常用算法,可采用 MATLAB、Python 等工具箱程序进行实现。

式(8)优化变量为半缝长 L 、缝高 H 、入口宽度 w_m 、宽度分布幂指数 n 。若缝高 H 和幂指数 n 为确定量,则反演量为半缝长 L 、入口宽度 w_m ;若缝长为确定量,则反演量为缝高、宽度和宽度分布幂指数。反演量越少(即已知量越多),反演的可靠性越高。此外,在已知岩石杨氏模量的情况下,可通过缝宽分布得到净压力分布。

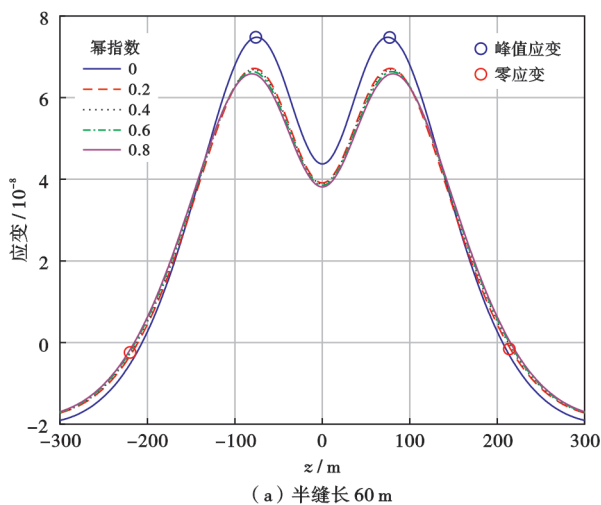
2 光纤特征应变与裂缝参数关系

基于光纤应变模型,对裂缝前缘的光纤应变分布特征及特征应变(零应变和峰值应变)进行计算分析,重点分析裂缝前缘应变分布与裂缝参数的相关性。笔者研究的光纤应变均指裂缝前缘的光纤应变,为表述方便,后文简述为光纤应变。基本参数为:裂缝形态为矩形,缝高为 60 m,缝口宽度为 1 mm,缝宽分布幂指数 n 为 0.4;压裂井与监测井水平间距为 200 m、监测井与压裂井水平段的深度相同;岩石泊松比为 0.2。

2.1 光纤应变对裂缝参数的敏感性

2.1.1 幂指数对光纤应变影响

光纤应变对幂指数 n 的敏感性如图 2 所示。图 2



中 z 为光纤轴向, $z=0$ 为裂缝所在平面, z 坐标大小表示光纤测点与裂缝面距离,如 $z = \pm 10$ m 表示光纤测点距离裂缝面 10 m。图 3 与图 4 的坐标含义与图 2 相同。由图 2 可知,光纤应变关于裂缝面呈对称分布,距离裂缝面较近时,为张应变;距离裂缝面较远时,为压应变,两者交界处为零应变。随着光纤测点与裂缝面距离增加,张应变先增后减,存在峰值(张)应变;相对于零应变位置,峰值应变位置更靠近裂缝面。

当半缝长小于 $1/2$ 井距($L < 0.5S_{\text{well}}$)时[图 2(a)],宽度分布的幂指数 n 对光纤应变分布影响较弱,尤其当幂指数在 0.2~0.8 范围变化时,不同幂指数的光纤应变几乎相同,说明裂缝前缘距离光纤井较远时,缝宽分布形式对于光纤应变分布影响较小;当半缝长大于 $1/2$ 井距($L > 0.5S_{\text{well}}$)时[图 2(b)],宽度分布的幂指数 n 对光纤分布影响变得显著:光纤应变分布形状与宽度分布幂指数相关;幂指数越小,即缝宽(或缝内压力)沿缝长的衰减越小,峰值应变越大;峰值应变位置变化较小,零应变位置变化显著,幂指数越小,零应变位置越靠近裂缝面。

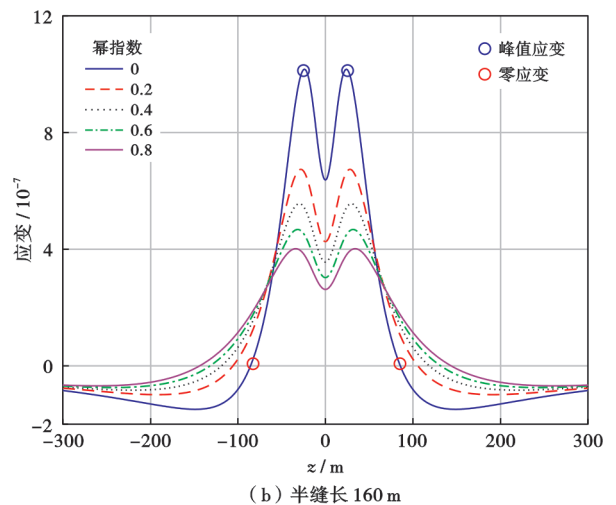


图 2 宽度分布幂指数 n 对光纤应变的影响

Fig. 2 Effect of the width distribution power exponent n on optical fiber strain

2.1.2 裂缝高度对光纤应变影响

缝高在 20~180 m 范围变化时,对裂缝前缘光纤应变的大小和分布差异进行了研究。图 3 展示了半缝长小于 $1/2$ 井距($L < 0.5S_{\text{well}}$)、大于 $1/2$ 井距($L > 0.5S_{\text{well}}$)时,不同缝高的裂缝产生的应变。由图 3 可以看出,不论光纤距离裂缝远近,光纤应变大小均随着缝高增加而增大;在裂缝前缘距离光纤井较远时,光纤沿程的峰值应变与零应变位置几乎不变;而裂缝前缘距离光纤较近时,光纤沿程的峰值应变和零应变位置均随缝高增加而靠近裂缝面。现场一般将瀑布图中红蓝交界处识别为零应变位置,而这个交界位置与瀑布图颜色的设置方式、人的视觉判断有关。由图 3(b)可

以看出,光纤应变在零应变位置以外变化幅度较小,因此存在一定观测误差;而峰值应变位置附近的应变变化较大,在数据图中更容易识别。

2.1.3 裂缝长度对光纤应变影响

图 4 为两种缝高(缝高 60 m 与 160 m)情况下,光纤应变与缝长变化关系。半缝长为 20 m 时,光纤峰值应变为 10^{-9} 量级;半缝长为 60 m 时,光纤峰值应变为 10^{-8} 量级;半缝长为 140 m 时,光纤峰值应变为 10^{-7} 量级。由此可知,缝长对光纤应变大小具有较强的决定作用。理论上,LF-DAS 邻井光纤应变监测精度可以达到 10^{-12} 量级^[29],因此不同缝长的应变均可在光纤应变监测有所体现。但由于环境噪音等影响,量级越

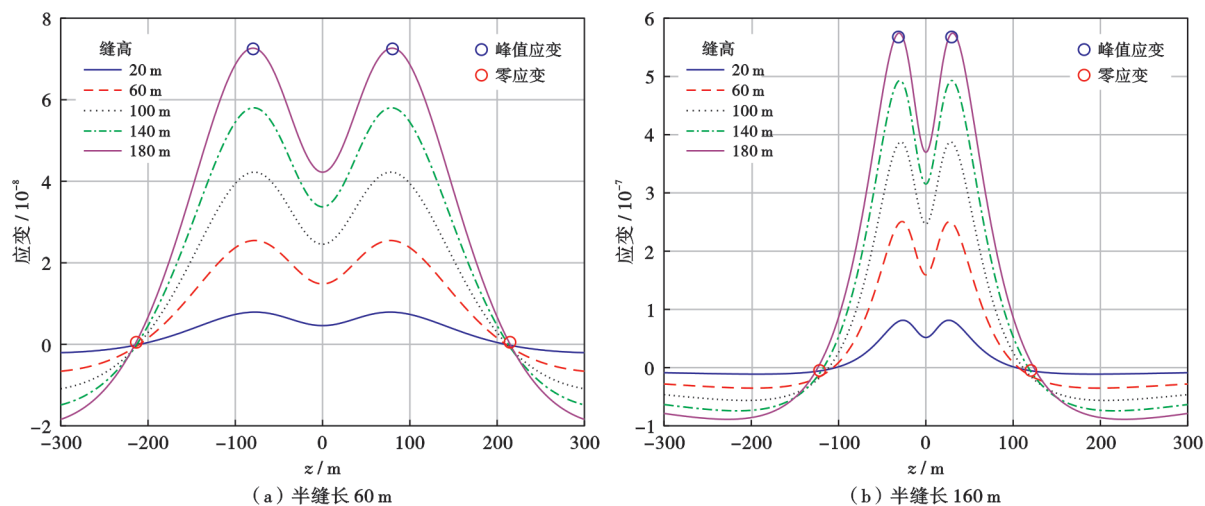


图3 裂缝高度对光纤应变的影响

Fig. 3 Effect of fracture height on optical fiber strain

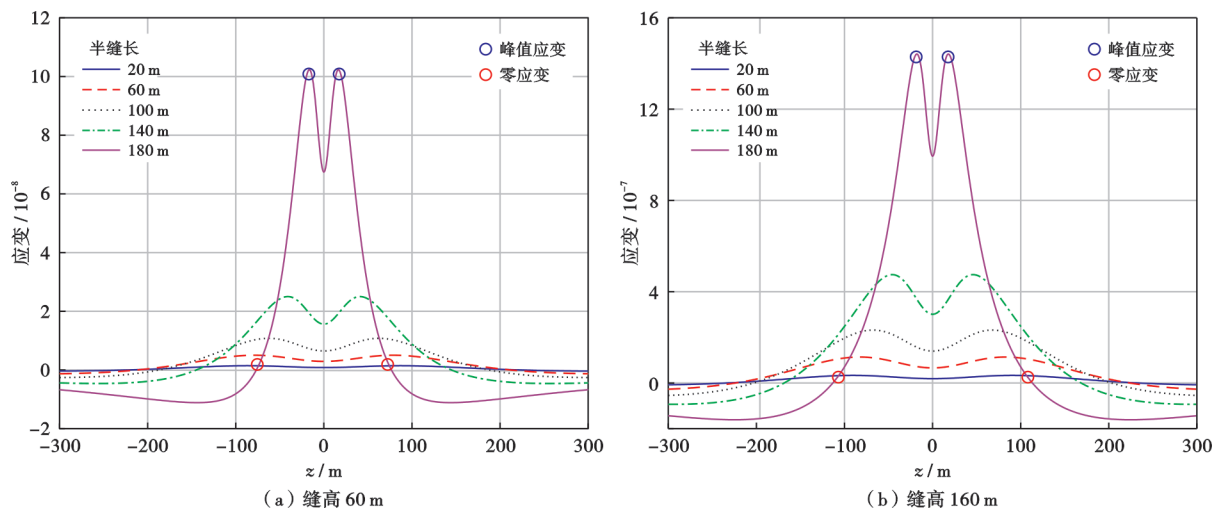


图4 裂缝长度对光纤应变分布的影响

Fig. 4 Effect of fracture length on the distribution of optical fiber strain

大的应变监测效果越好,尤其是裂缝接近光纤时应变量级更有跃升,这也是目前邻井光纤应变更容易用于识别压窜的原因。对比不同幂指数(图2)和缝高(图3)的应变分布,不同幂指数或者缝高的光纤应变虽然有变化,但峰值应变数值变化在同一个数量级,而缝长则影响了光纤应变的几个数量级,说明缝长是影响(裂缝前缘)光纤应变的最敏感因素之一。

同时,由图4也可以看出,零应变位置和峰值应变位置随缝长增加,逐渐靠近裂缝面。两个特征应变位置也是对缝长变化较为敏感。因此,笔者对零应变和峰值应变位置进一步深入分析。

2.2 零应变、峰值应变与裂缝参数相关性

2.2.1 参数敏感性

图5为峰值应变、零应变位置与幂指数的变化关系。当半缝长为60 m(即 $L < 0.5S_{\text{well}}$)时,零应变位置和峰值应变位置随幂指数基本不变;而当半缝长为160 m(即 $L > 0.5S_{\text{well}}$)时,零应变位置随着幂指数增加

而显著增加, n 从0增大到0.8,零应变位置从80 m增加到140 m,峰值应变变化幅度较小,由22 m增大到35 m。当裂缝前缘距离光纤井较近时,缝内宽度分布对于零应变位置显著影响,而峰值应变位置变化相对较小。

图6为峰值应变、零应变位置与幂指数的变化图。与幂指数的影响规律类似,当半缝长为60 m(即 $L < 0.5S_{\text{well}}$)时,零应变位置和峰值应变位置均随缝高基本不变;而当半缝长为160 m(即 $L > 0.5S_{\text{well}}$)时,零应变位置随着幂指数增加而显著增加,缝高从20 m增大到180 m,零应变位置从100 m增加到120 m,峰值应变变化幅度较小,由26 m增大到30 m。当裂缝前缘距离光纤井较近时,缝高显著影响零应变位置,而峰值应变位置对缝高变化的敏感性较小。从图6可以看出,不同缝高情况下(缝高为60 m、160 m),峰值应变、零应变位置均随缝长增加而降低,呈现幂指数变化特征。图7为峰值应变、零应变位置与半缝长的变化。

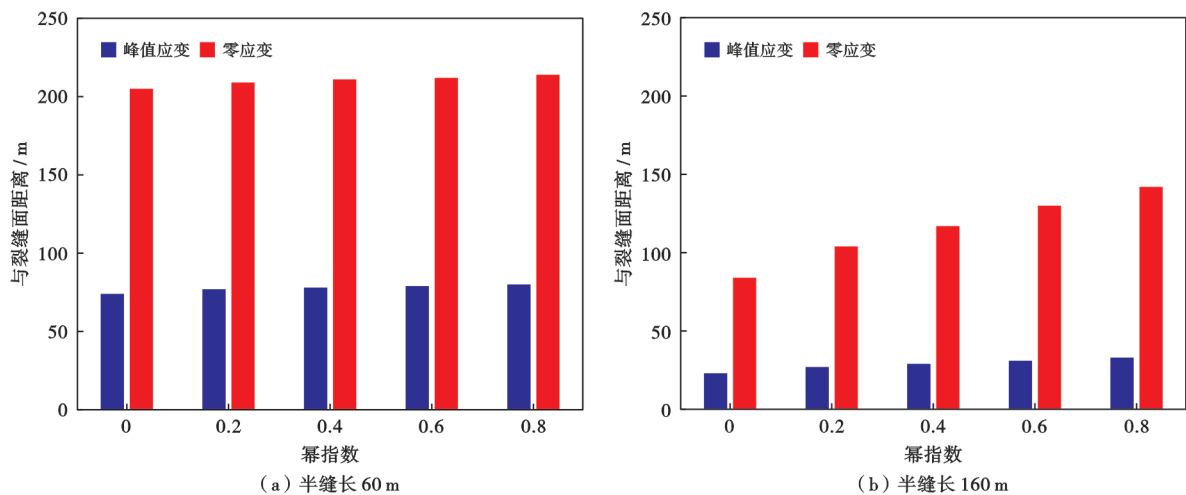


图 5 峰值应变、零应变与幂指数关系

Fig. 5 Relationship between peak strain, zero strain, and power exponent

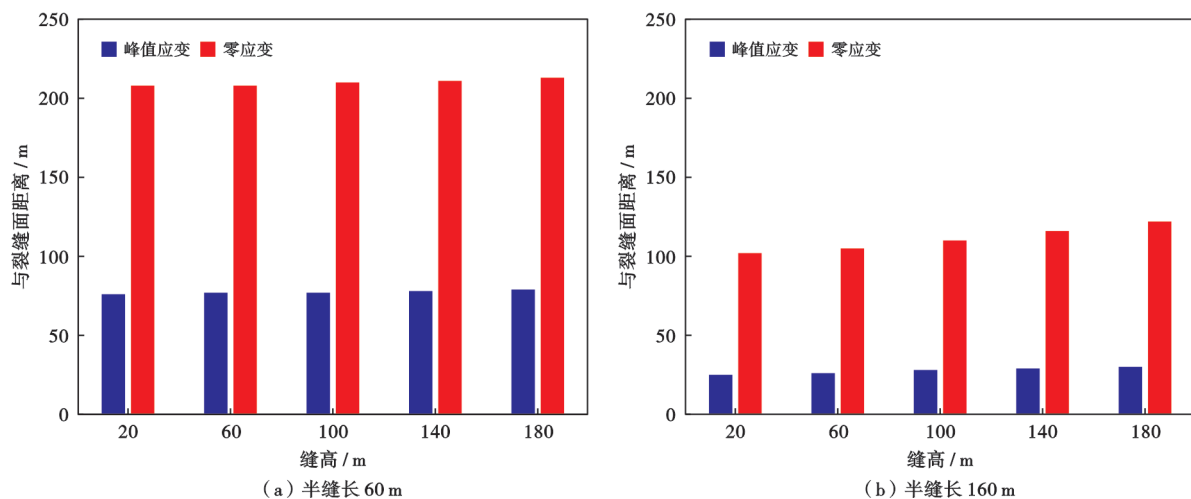


图 6 峰值应变、零应变与缝高关系

Fig. 6 Relationship between peak strain, zero strain, and fracture height

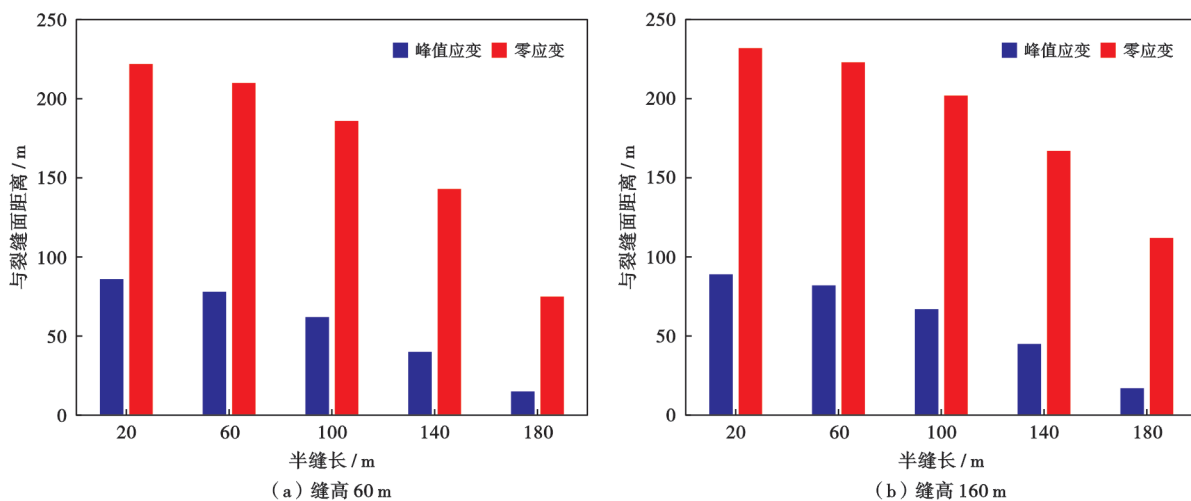


图 7 峰值应变、零应变与半缝长关系

Fig. 7 Relationship between peak strain, zero strain, and half-fracture length

2.2.2 零应变、峰值应变位置与缝长的关系式建立

相较于零应变,峰值应变位置更靠近裂缝面,而且在靠近光纤时,峰值应变对于缝高、应变分布不太敏感。考虑不同缝长的零应变、峰值应变呈现幂指数变化特征,采用幂指数函数进行拟合。为避免量纲影响,将零应变位置、峰值应变位置、缝长均除以井间距 S_{well}

得到无量纲,拟合公式为:

$$\begin{cases} D_0/S_{well} = a_0 (L/S_{well})^{b_0} + c_0 \\ D_m/S_{well} = a_m (L/S_{well})^{b_m} + c_m \end{cases} \quad (9)$$

图8为不同缝高情况的无量纲零应变位置、无量纲峰值应变位置与无量纲缝长计算结果和拟合关系式,判定系数 R^2 均大于0.99。式(9)的拟合系数见表1和表2。

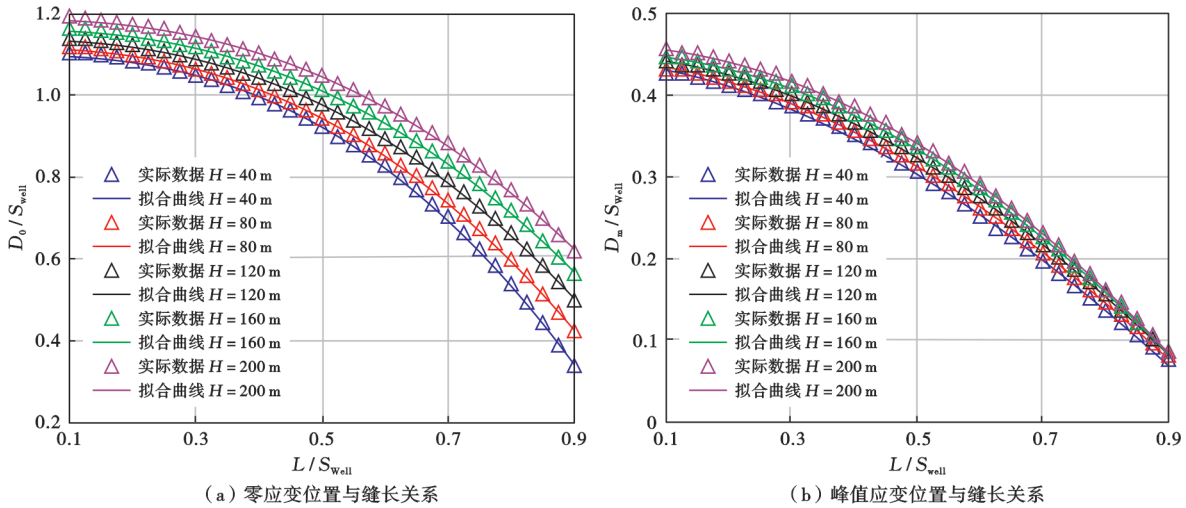


图8 特征应变与缝长拟合关系式

Fig. 8 Fitting relational expression between characteristic strain and fracture length

表1 零应变位置与缝长关系式的拟合系数

Table 1 Fitting coefficients of the relational expression between zero strain position and fracture length

缝高/m	缝高/井距	a_0	b_0	c_0
20	0.1	-1.027	2.546	1.092
40	0.2	-0.983	2.483	1.098
60	0.3	-0.934	2.422	1.106
80	0.4	-0.885	2.368	1.115
100	0.5	-0.847	2.359	1.124
120	0.6	-0.811	2.350	1.136
140	0.7	-0.783	2.352	1.147
160	0.8	-0.758	2.345	1.160
180	0.9	-0.738	2.347	1.173
200	1.0	-0.720	2.359	1.186

表2 峰值应变位置与缝长关系式的拟合系数

Table 2 Fitting coefficients of the relational expression between peak strain position and fracture length

缝高/m	缝高/井距	a_m	b_m	c_m
20	0.1	-0.451	1.709	0.438
40	0.2	-0.443	1.698	0.440
60	0.3	-0.441	1.713	0.442
80	0.4	-0.439	1.766	0.442
100	0.5	-0.442	1.795	0.446
120	0.6	-0.443	1.823	0.448
140	0.7	-0.446	1.858	0.451
160	0.8	-0.451	1.934	0.452
180	0.9	-0.456	1.933	0.456
200	1.0	-0.461	1.947	0.460

若已知缝高或可估算缝高尺寸范围,则可利用式(9)的峰值应变或零应变位置对缝长进行快速计算。相对于零应变位置,峰值应变位置对于缝高不敏感,因此在未知缝高情况下,利用峰值应变能更可靠地快速评估缝长。

3 裂缝参数反演方法及可行性分析

3.1 反演方法

(1) 通过光纤应变率或应变瀑布图识别裂缝延伸至光纤监测井时刻,如果没有明显“应变条带”汇聚型态,说明裂缝未达到光纤井,光纤监测到的应变即为裂缝延伸过程裂缝前缘的应变场。

(2) 截取裂缝碰到光纤之前的光纤应变,该应变即为需要反演的实际数据;若实际数据为应变率,则通过应变率的时间积分得到应变。

(3) 分析监测应变的特征应变,主要为峰值应变的位置,通过该参数对裂缝长度进行快速计算。

(4) 求解基于裂缝前缘光纤应变的裂缝参数反演模型[式(8)],结合缝长的初步估算结果,通过基于梯度的内点法进行数值计算,得到不同时刻的裂缝参数反演结果。反演流程如图9所示。

3.2 反演方法可靠性分析

正演模型可以得到裂缝扩展不同时刻的应变和应变率数据。以平面三维裂缝扩展诱发光纤应变正演模

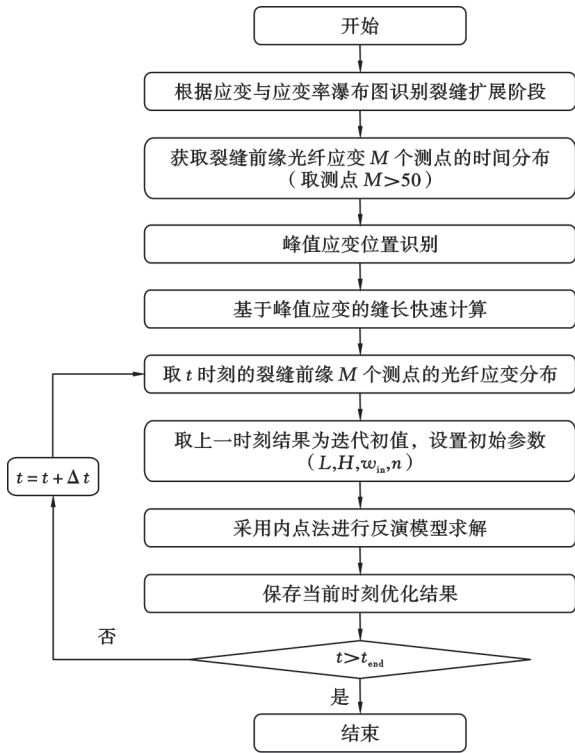
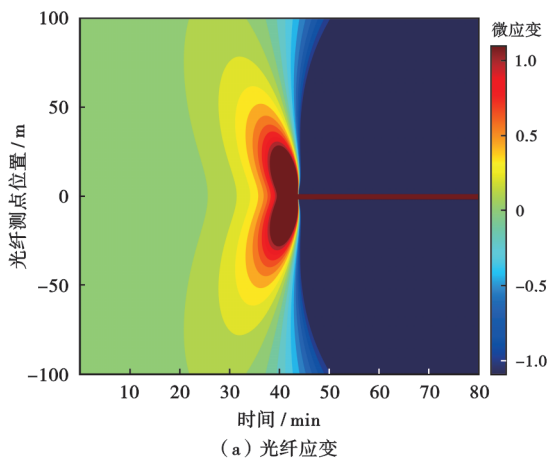


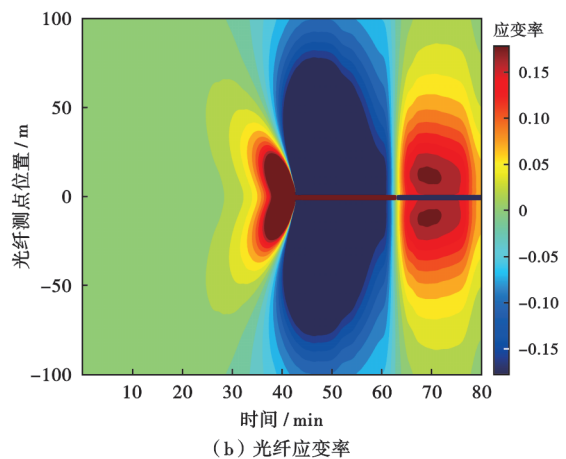
图 9 反演流程

Fig. 9 Flowchart of the inversion method

型得到的应变为人工合成的监测数据^[13],通过本文反演方法计算裂缝参数,若反算的裂缝参数与实际裂缝参数相符,则说明反演方法有效。正演模型的基本参数为:压裂段为单缝,井间距为 300 m,监测井水平段与压裂井水平段的深度相同;注入排量为 3 m³/min,液体黏度为 10 mPa·s,注入时间为 60 min,停泵时间为 20 min;杨氏模量为 32 GPa,泊松比为 0.2,断裂韧性为 0.5 MPa·m^{0.5},压裂层厚度为 60 m,上下有 10 MPa 的应力遮挡层,缝高限制为 60 m。裂缝扩展过程半缝长变化曲线如图 10 所示,压裂过程的应变与应变率瀑



(a) 光纤应变



(b) 光纤应变率

图 11 正演模拟得到的光纤应变与应变率瀑布

Fig. 11 Waterfall plot of optical fiber strain and strain rate obtained by forward modeling

布如图 11 所示。

裂缝在 42 min 半缝长为 300 m,延伸至邻井光纤监测井(图 10),因此在 42 min 时光纤应变与应变率瀑布图出现红色条带(图 11)。42 min 之前裂缝未达到光纤位置,因此采用 42 min 之前的光纤应变数据进行反演。

根据式(9)可得基于零应变与峰值应变的缝长快速计算式为:

$$L = \begin{cases} S_{\text{well}} \left[\frac{1}{a} \left(\frac{D_0}{S_{\text{well}}} - c_0 \right) \right]^{\frac{1}{b_0}}, & \text{零应变方法} \\ S_{\text{well}} \left[\frac{1}{a} \left(\frac{D_0}{S_{\text{well}}} - c_m \right) \right]^{\frac{1}{b_m}}, & \text{峰值应变方法} \end{cases} \quad (10)$$

取缝高分别为 20 m、60 m、100 m 和 140 m,根据正演模型得到的零应变位置、峰值应变位置,采用式(10)进行缝长快速反演(图 12)。对比基于零应变和峰值

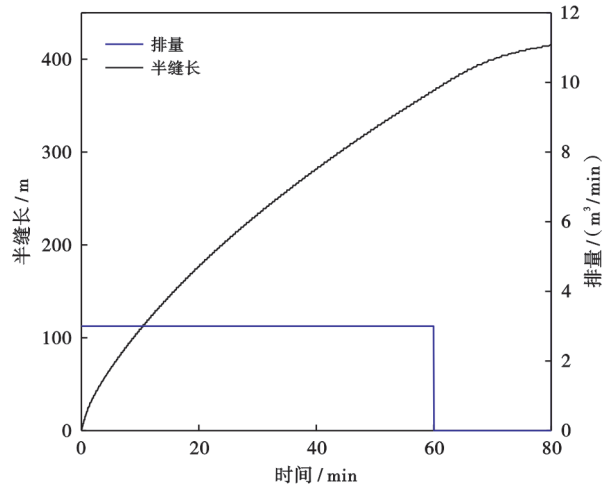


图 10 正演模拟的裂缝半长变化曲线

Fig. 10 Variation curve of fracture half-length simulated by forward modeling

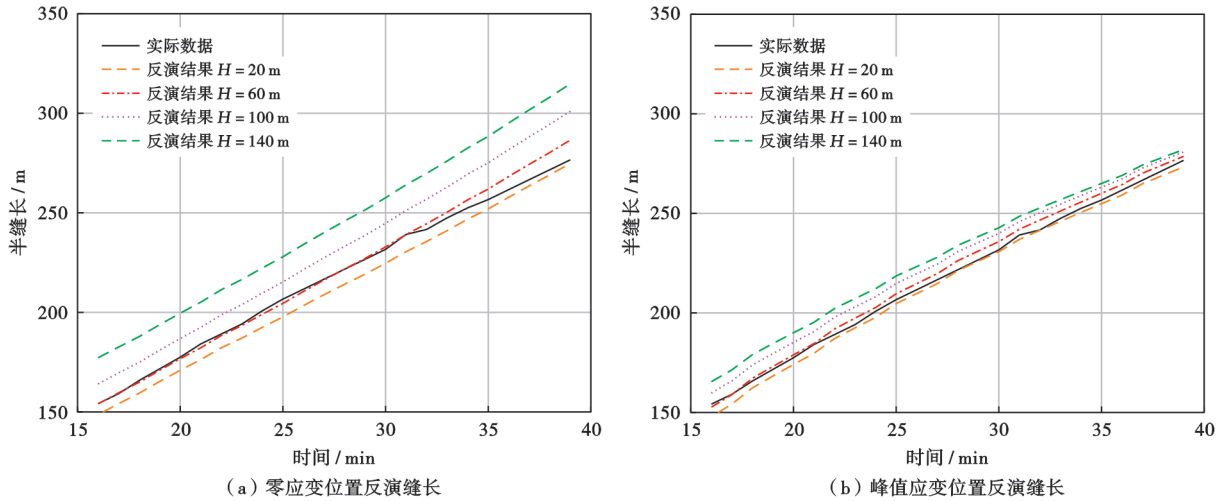


图 12 基于零应变与峰值应变的缝长快速反演

Fig. 12 Fast inversion of fracture length based on zero strain and peak strain

应变位置的缝长反演结果,当已知缝高的情况下,两者均能较好地得到实际缝长;而不确定缝高的情况下,基于零应变的缝长反演,在不同缝高时得到的缝长差异较大,而基于峰值应变的缝长反演,在不同缝高情况下的差异并不显著。因此,基于峰值应变的缝长反演可以更可靠地反演缝长,而不受缝高数据的显著影响。

采用反演模型[式(8)]进行裂缝参数反演,同时反演 L 、 H 、 ω_{in} 与 n ,采用内点法进行数值计算泵注 15~39 min 的裂缝参数。每次裂缝参数的计算迭代步数为 20~50,普通个人计算机(i7-10700 CPU-2.90 GHz)计算耗时在 10 min 以内,计算效率高,适合工程应用。采用随机方法的优化解法(如模拟退火等^[30])的计算时间通常为数小时,因此,对于这种梯度明确的小规模优化问题,采用基于梯度的内点法更合适工程分析应用。

4 个参数同时反演的结果如图 13 所示。反演时缝长方向取 40 个单元、缝高取 20 个单元。从图 13(a)可以看出,通过反演确实得到了与监测值匹配的光纤应变。从图 13(b)~图 13(d)可以看出,只有缝长的反演结果与实际参数接近(误差 $<4\%$),而缝宽和缝高的误差非常大,尤其在 35 min 后,即裂缝更加靠近光纤井时,反演缝宽和缝高的趋势突变,与实际误差较大。这是由于裂缝前缘靠近光纤时,裂缝宽度分布对光纤应变的影响增加,仅通过假设的幂指数宽度分布不能足够准确描述缝内宽度分布。通过反演测试可以说明,同样的光纤应变可对应不同的缝宽、缝高和幂指数 n ,因此通过裂缝前缘的光纤应变反演得到可靠的缝宽、缝高的难度较大;而缝长则具有较高的可靠性。

为进一步说明反演的多解性问题,将反演模型中缝高限定为准确值 60 m,假定不同的幂指数 n ,仅反演

L 、 ω_{in} ,结果如图 14 所示。不同幂指数的缝长趋势均匀实际缝长相同,最大误差为 4.3%;而缝宽趋势与实际缝宽存在显著差异,尤其在 37 min(裂缝尖端靠近光纤)后,缝内压力分布对应变分布影响明显(图 13),因此缝宽误差显著增大(最大为 70%)。

同样,将幂指数限定为 0.4,设定不同缝高,仅反演 L 、 ω_{in} (图 15)。由图 15 可以看出,不同缝高情况下,缝长的反演结果差别很小(相对误差均在 3%以内),而缝宽结果差异显著,缝高为 20 m 时缝宽结果明显偏大,误差达到 200%;缝高为 60 m(真实缝高)时,宽度误差最小,缝高为 100 m 时,宽度偏小,误差为 53%。不同缝宽、缝高组合的应变均能与真实光纤应变吻合,说明缝宽、缝高的结果具有较强多解性,只有对缝高、缝宽分布获得接近真实值的认识,才可能得到可靠的缝宽反演结果。因此,基于峰值应变的缝长快速反演,在未知缝高的情况下可较准确地得到缝长结果。这种方法需要对实际数据的峰值点进行准确计算。采用基于裂缝前缘光纤应变的裂缝参数反演模型,由于方程的公式明确,可方便计算梯度,通过基于梯度的内点法可高效求解该类优化问题;基于裂缝前缘光纤应变的裂缝参数反演,较为准确地获得缝长结果,而缝高、缝宽具有较强多解性。

裂缝参数多解性是反问题的共性特征,也与裂缝诱导应变的空间衰变特征有关。与监测点距离较近的裂缝是光纤应变的主要来源,因此其他位置的裂缝宽度对于应变贡献微小,从而进一步加剧了多解性。理论上,裂缝与应变监测点距离较远时,裂缝形态对应变分布的影响微小,仅与这些裂缝单元的总体的体积有关,该部分的原理与测斜仪监测理论一致。

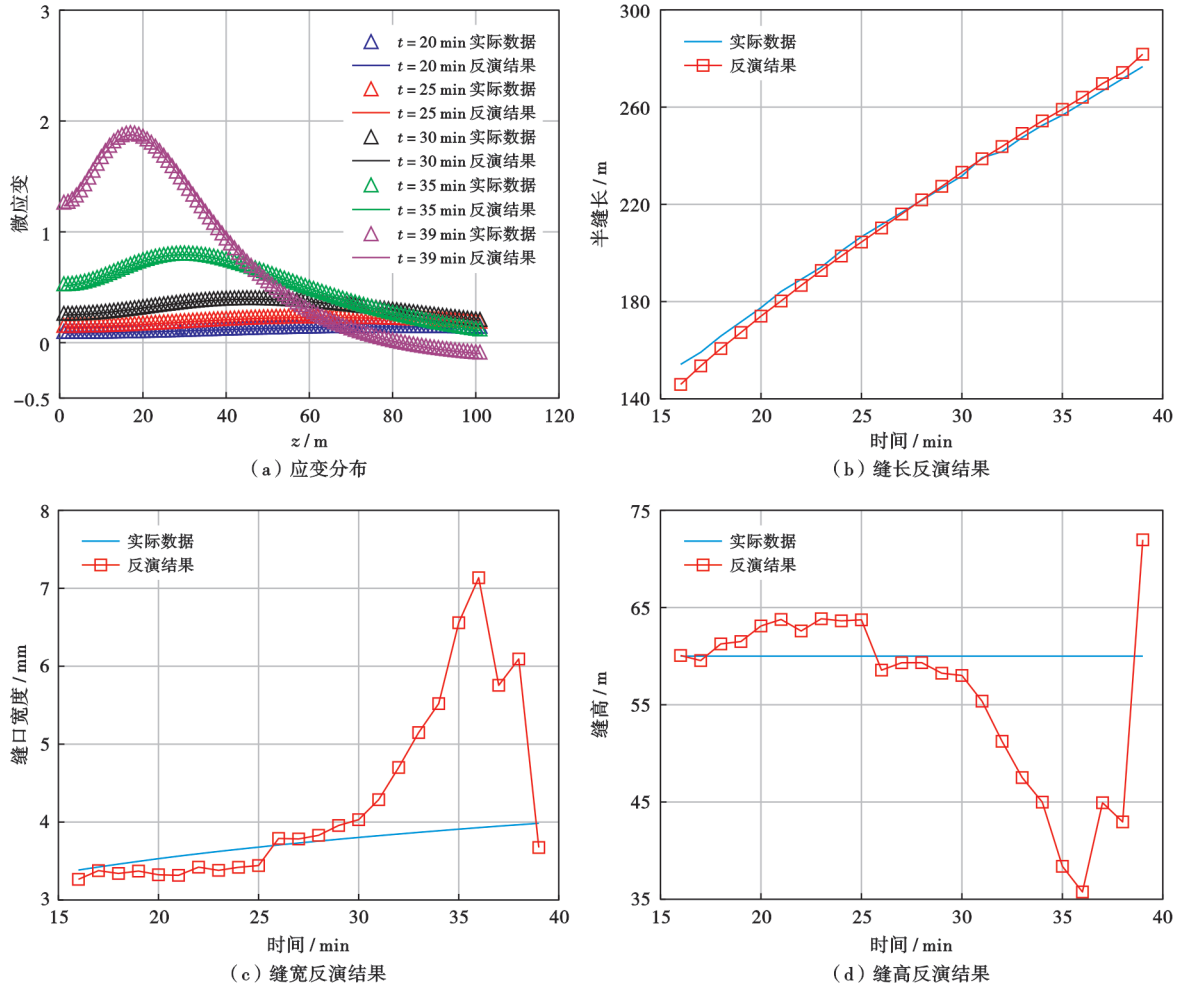


图 13 基于反演模型的四参数同时反演的结果

Fig. 13 Results of simultaneous inversion of four parameters based on the inversion model

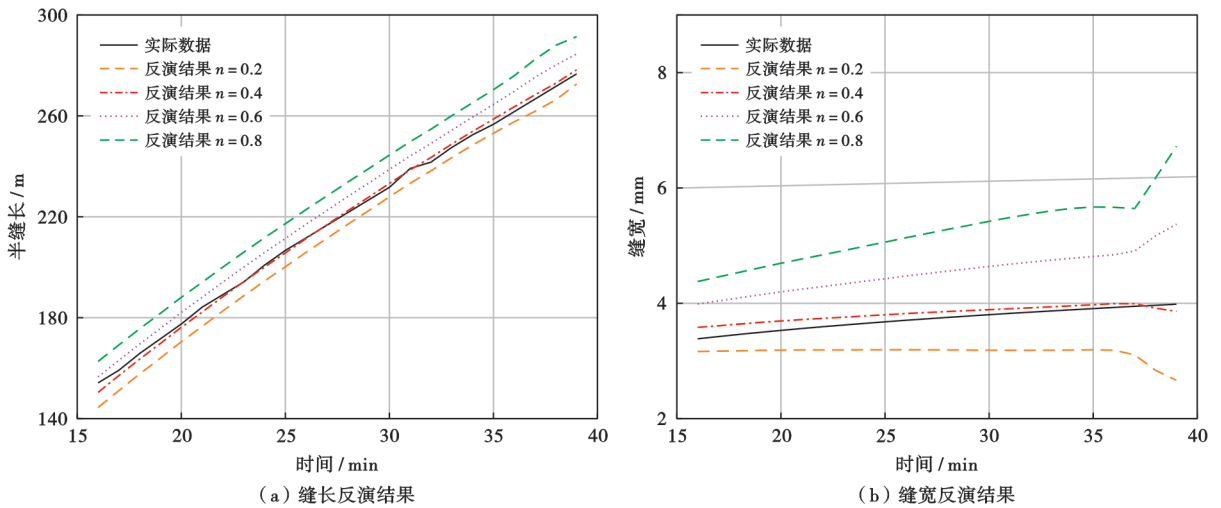


图 14 不同幂指数的裂缝参数反演结果

Fig. 14 Inversion results of fracture parameters with different power exponents

为了解决多变量反演的准确性,建议可采用两种技术手段:①联合多源监测^[31]技术(如压力解释等^[32-33])提供更多裂缝信息;②采用更精细的反演

方法(如 Kalman 滤波等^[34]),该类方法需要复杂的理论计算模型,通常计算量较大,反演实时性有待提升。

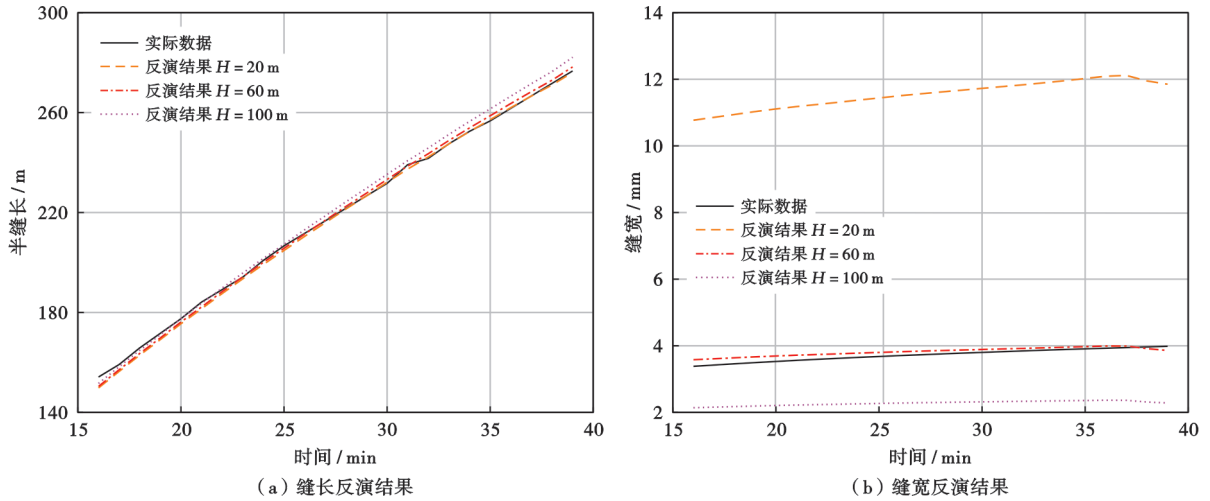


图 15 不同缝高的裂缝参数反演结果

Fig. 15 Inversion results of fracture parameters with different fracture heights

4 实际监测井应用

4.1 监测概况与数据处理

数据源自 Permian Delaware 盆地的 HFTS-2 压裂项目^[35-38],包括 1 口直井(B5PH 井)和 8 口水平井(T13H 井、T14H 井、T15H 井、T16H 井、B1H 井、B2H 井、B3H 井和 B4H 井)。水力压裂试验场二期的井位部署如图 16 所示。B4H 井压裂过程,B3H 井进行邻井光纤应变监测。B4H 井第 19 段的压裂裂缝为单裂裂缝,且通过 B5PH 井光纤直井监测到缝高大约为 200 m^[38],因此采用 B4H 井的第 19 段的压裂裂缝进行分析,监测井为 B3H 井。B3H 井与 B4H 井的横向井距(水平井距)为 200 m,纵向井距为 60 m。

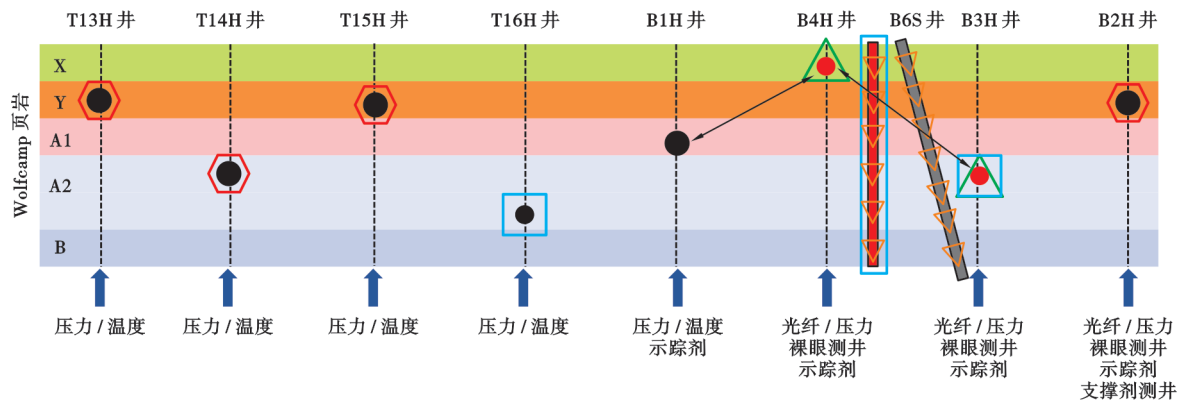
图 16 水力压裂试验场二期的井位部署^[29]

Fig. 16 Well location deployment diagram of Phase II of hydraulic fracturing test site

现场实例井给出的数据为相位率,通过相位率可得到应变率^[29]:

$$\dot{\epsilon}_{\text{meas}} = \frac{\lambda}{4\pi n_f L_g \zeta} \dot{\phi} \quad (11)$$

对应变率进行时间积分,即得到不同时刻的应变:

$$\epsilon_{\text{meas}} = \int_0^t \dot{\epsilon}_{\text{meas}} dt = \sum \dot{\epsilon}_{\text{meas}} \Delta t \quad (12)$$

该现场案例中光纤基础参数为:波长为 1.55×10^{-12} m,标距为 7.0 m,折射率为 1.445,光弹性系数为 0.735。根据式(11)一式(12)计算不同时刻的应变率和应变,并绘制 B4H 井第 19 段压裂裂缝扩展过程的 B3H 井光纤应变率与应变瀑布图(图 17)。

井和 B4H 井)。水力压裂试验场二期的井位部署如图 16 所示。B4H 井压裂过程,B3H 井进行邻井光纤应变监测。B4H 井第 19 段的压裂裂缝为单裂裂缝,且通过 B5PH 井光纤直井监测到缝高大约为 200 m^[38],因此采用 B4H 井的第 19 段的压裂裂缝进行分析,监测井为 B3H 井。B3H 井与 B4H 井的横向井距(水平井距)为 200 m,纵向井距为 60 m。

4.2 基于裂缝前缘光纤应变的裂缝参数解释

4.2.1 基于峰值应变的缝长快速计算

根据图 17 可以看出,施工泵注约为 60 min 时,裂缝碰到光纤井;通过应变率与应变的汇聚条带的位置,可判断裂缝面位置约为 4 750 m。理论情况下,随着距裂缝面距离增加,裂缝前缘光纤应变呈现先增、后减小的分布趋势,而实际监测到应变在 4 750~4 900 m 存在异常增加的分段,考虑到理论上光纤应变关于裂缝面的对称分布特征,采用 4 600~4 750 m(距离裂缝面 150~0 m)的数据进行反演。

图 18(a)为距离裂缝面 1~150 m 光纤在裂缝碰到

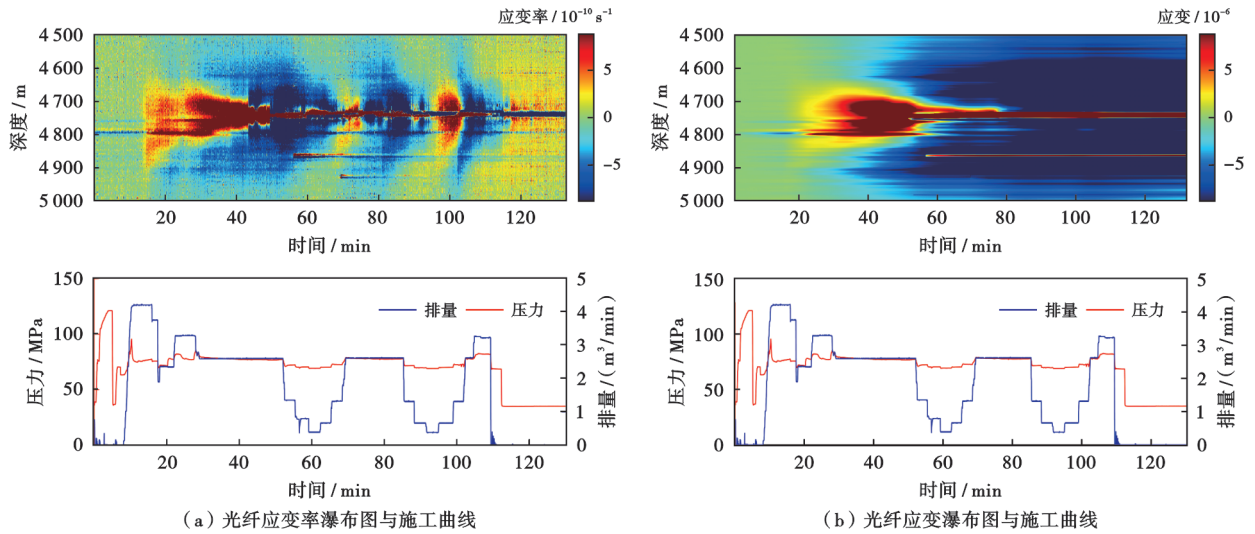


图 17 B4H 第 19 段压裂过程邻井 B3H 井的光纤应变率与应变分布

Fig. 17 Optical fiber strain rate and strain distribution in the adjacent Well B3H during the fracturing process of Stage 19 of B4H

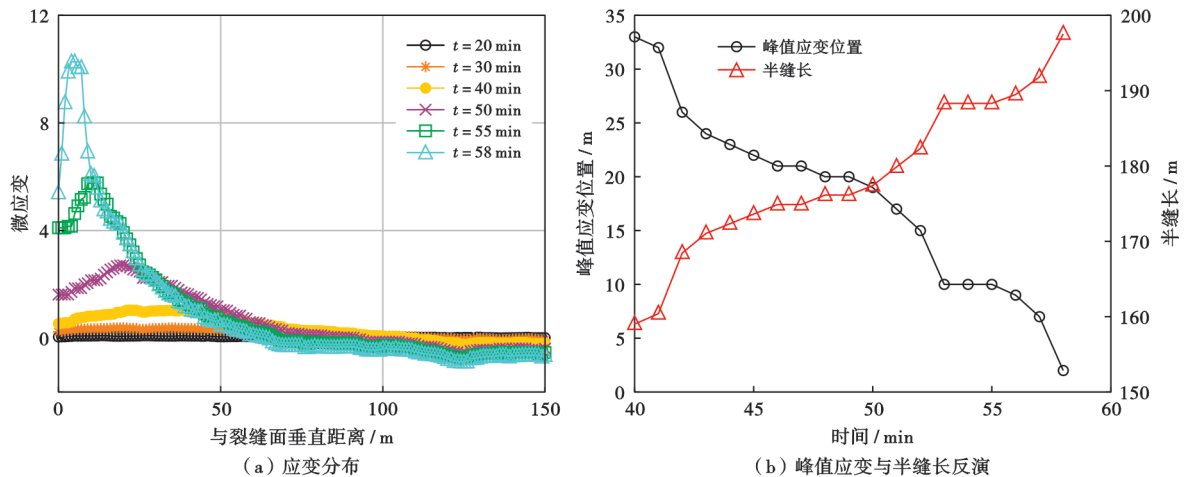


图 18 实际井的光纤应变与基于峰值应变的缝长快速反演

Fig. 18 Optical fiber strain and fast inversion of fracture length based on peak strain of field wells

光纤前的应变分布(即裂缝前缘光纤应变分布)。从图 18(a)可以看出,随着注入时间增加,裂缝前缘光纤应变逐渐增大,峰值应变位置逐渐靠近裂缝面。在注入 40 min 之前,峰值应变不容易识别,图 18(b)为 40~58 min 峰值应变位置和基于峰值应变的缝长反演结果。直井光纤监测该段缝高为 200 m,因此采用表 2 中缝高为 200 m 的反演系数。从图 18(b)可以看出,注入 40 min 时,半缝长达 160 m,在 58 min 时,半缝长达 195 m;因此裂缝在 40~58 min 时间段的平均扩展速度为 1.94 m/min。

4.2.2 基于光纤应变反演模型的裂缝参数解释

进一步采用裂缝前缘光纤应变反演模型[式(8)]进行裂缝参数解释,反演数据为 20~58 min 的光纤应变,该阶段应变为裂缝前缘光纤应变。

沿缝长、缝高方向单元数均为 40,设定缝宽分布

指数为 0.1~0.4,反演缝长和缝宽结果如图 19 所示。不同幂指数 n 时,缝长反演趋势相同,但 n 为 0.4 时,缝长在 53 min 达到 200 m,与瀑布图结果不符;同时 n 为 0.4 时,在 53 min 后,缝宽迅速减小。分析其原因为:缝长已经达到或超过井距,光纤应变已经不再是裂缝前缘应变,基于裂缝前缘光纤应变的反演模型已不再适用。因此,结合裂缝宽度变化趋势,幂指数为 0.4 时,在裂缝靠近光纤井时,缝宽反演出现异常。

幂指数为 0.1~0.3 时,缝长均小于井距 200 m,反演缝长差距在 10~16 m;不同幂指数的缝宽变化趋势相同,在注入 45 min 之前,不同幂指数反演的缝宽差异最大为 0.02 mm,随后差异增加,在 58 min 时,缝宽差异达到 1.1 mm。

从裂缝扩展动态来看,该井第 19 段的压裂裂缝在

20~28 min时,裂缝半长由130 m增长到170 m,扩展速度达到5 m/min;在28~58 min,裂缝扩展速度下降,30 min内半缝长从170 m增加到194 m,扩展速度为0.8 m/min。其中,42~58 min的缝长反演结果与基于峰值应变的反演结果接近,进一步说明基于峰值应变进行裂缝长度解释的可行性。由缝宽反演曲线[图

19(b)]可以看出,注入到30 min时,缝宽仅为0.5 mm,此时不能加砂,或只能加小粒径支撑剂才能保证支撑剂进入裂缝;在注入到50 min后,缝宽可达到1.6~2.0 mm,此时40/70目、20/40目支撑剂均可顺利进入裂缝。本文模型的反演计算量小,可实现现场实时应变的解释分析,反演结果可用于压窜分析、加砂参数调整等。

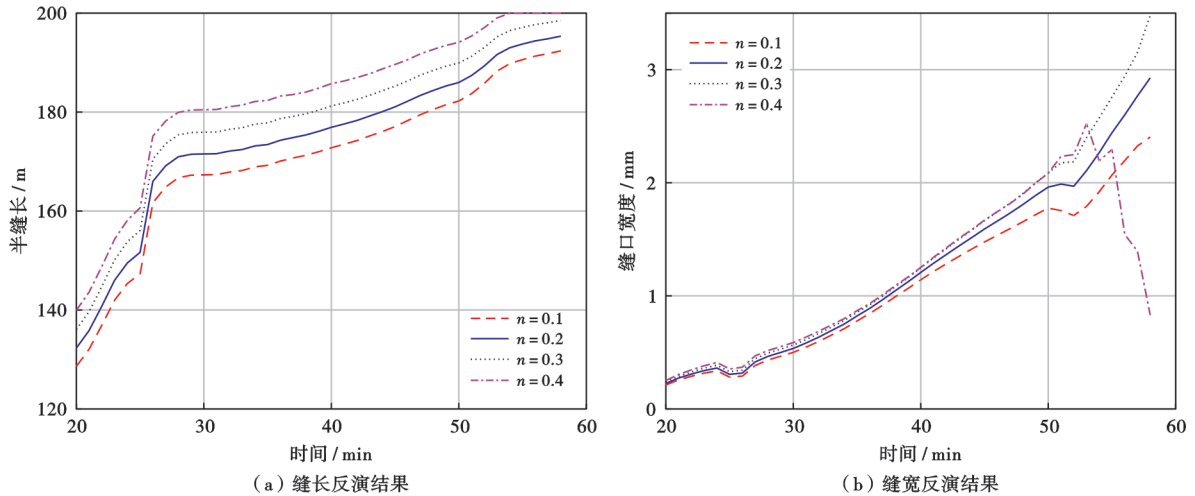


图19 基于反演模型的缝长和缝宽反演

Fig. 19 Inversion of fracture length and fracture width based on inversion model

5 结论

(1) 裂缝前缘光纤应变与缝长、缝高和缝宽分布均相关,但缝长对裂缝前缘的光纤应变最为敏感。

(2) 裂缝前缘光纤应变存在零应变与峰值应变特征应变,相对于零应变,峰值应变更靠近裂缝面,且对缝宽分布和缝高相对不敏感。

(3) 建立的峰值应变与缝长的相关关系式,可快速反演裂缝长度。

(4) 基于梯度的内点法可快速求解反演模型,适用于工程应用分析。

(5) 基于裂缝前缘光纤应变的裂缝参数反演可得到准确的缝长参数,而缝宽、缝高参数反演的误差较大,存在较强的多解性,建议可通过多源数据反演或更为精细的反演技术进行解决。

符号注释: a —单元半长, m; b —单元半高, m; a_0 、 b_0 、 c_0 —零应变公式拟合系数; a_m 、 b_m 、 c_m —峰值应变公式拟合系数; d_{well} —纵向井距, m; D_0 —零应变与裂缝面距离, m; D_m —峰值应变与裂缝面距离, m; E —杨氏模量, Pa; H_{max} —最大缝高, m; f —反演函数; H —缝高, m; I_z 、 I_{xz} 、 I_{zzz} 、 I_{yy} 、 I_{xzz} 、 I_{yyz} —核函数; L —半缝长, m; L_g —标距, m; n —宽度分布幂指数; n_f —光纤折射率; M —光纤测点数量; N —裂缝单元个数; N_L —缝长

方向单元数量; p_{net} —净压力, Pa; S_{well} —横向井距, m; t —时间, s; t_{end} —计算结束时间, s; Δt —时间间隔, s; w_{max} —最大缝宽, m; w_j —第 j 个单元的宽度, m; w_{in} —缝口宽度, m; x 、 y 、 z —坐标轴, m; ξ —局部坐标系的单元横轴坐标, m; η —局部坐标系的单元纵轴坐标, m; σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} — x 、 y 、 z 轴方向的正应力, MPa; u_{zz} —光纤轴向位移, m; ν —泊松比; ϵ_f —光纤应变模型计算得到的应变; ϵ_{meas} —实际监测的光纤应变; λ —波长, m; $\dot{\phi}$ —相位率, rad/s; ζ —光弹性系数; $\dot{\epsilon}_{\text{meas}}$ —实际监测的光纤应变率; ϕ —相位, rad; u_f —光纤位移, m; z_{fiber} —光纤轴向坐标位置, m; Δx 、 Δy —单元长度和高度, m。

参考文献

- [1] 孙龙德, 刘合, 朱如凯, 等. 中国页岩油革命值得关注的十个问题[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2007-2019.
SUN Longde, LIU He, ZHU Rukai, et al. Ten noteworthy issues on shale oil revolution in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2007-2019.
- [2] 雷群, 管保山, 才博, 等. 储集层改造技术进展及发展方向[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 580-587.
LEI Qun, GUAN Baoshan, CAI Bo, et al. Technological progress and prospects of reservoir stimulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 605-613.
- [3] 翁定为, 雷群, 管保山, 等. 中美页岩油气储层改造技术进展及发展方向[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2297-2307.

- WENG Dingwei, LEI Qun, GUAN Baoshan, et al. Progress and development directions of reservoir stimulation techniques for shale oil and gas in China and the United States[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(12): 2297-2307.
- [4] JIN Ge, ROY B. Hydraulic-fracture geometry characterization using low-frequency DAS signal[J]. *The Leading Edge*, 2017, 36(12): 962-1044.
- [5] NATH F, HOQUE S M S, MAHMOOD M N. Recent advances and new insights of fiber optic techniques in fracture diagnostics used for unconventional reservoirs[R]. URTEC 3871673, 2023.
- [6] LI Xinyang, CHAVARRIA A J, OUKACI Y. Realtime wellbore digitalization for stimulations using multi-well fiber optics[R]. SPE 207710, 2021.
- [7] BUSSETTI S, KAZEI V, MERRY H. Assessing geological deformation using distributed fiber optic sensing[R]. SPE 213495, 2023.
- [8] 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(2): 87-103.
SUI Weibo, WEN Changyun, SUN Wenchang, et al. Joint application of distributed optical fiber sensing technologies for hydraulic fracturing monitoring[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(2): 87-103.
- [9] UGUETO G A, HAFFENER J, MONDAL S, et al. Spatial and temporal effects on low frequency DAS and microseismic implications on hydraulic fracture geometry and well interactions[R]. SPE 209180, 2022.
- [10] LIU Yongzan, WU Kan, JIN Ge, 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.
- [11] TANG Jin, ZHU Ding. Characterize fracture development through strain rate measurements by distributed acoustic sensor DAS[R]. SPE 205267, 2022.
- [12] TAN Yunhui, WANG Shugang, RIJKEN M C M, et al. Geomechanical template for distributed acoustic sensing strain patterns during hydraulic fracturing[J]. *SPE Journal*, 2021, 26(2): 627-638.
- [13] ZHANG Zhishuai, FANG Zijun, STEFANI J, et al. Fiber optic strain monitoring of hydraulic stimulation; geomechanical modeling and sensitivity analysis[R]. URTEC 2020-2648, 2020.
- [14] ZHANG Zhishuai, FANG Zijun, STEFANI J, et al. Modeling of fiber-optic strain responses to hydraulic fracturing[J]. *Geophysics*, 2020, 85(6): A45-A50.
- [15] 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 Ming, GUO Tiankui, XU Yun, 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): 211-222.
- [16] HAFFENER J, HAUSTVEIT K, INGLE T. Did we break new rock? Utilizing diagnostics to differentiate new fracture creation vs old fracture reactivation; a Meramec and Wolfcamp study[R]. SPE 209123, 2022.
- [17] UGUETO G A, TODEA F, DAREDA T, et al. Can you feel the strain? DAS strain fronts for fracture geometry in the BC Montney, Groundbirch[R]. SPE 195943, 2019.
- [18] LEGGETT S, REID T, ZHU Ding, et al. Experimental investigation of low-frequency distributed acoustic strain-rate responses to propagating fractures[J]. *SPE Journal*, 2022, 27(6): 3814-3828.
- [19] LEGGETT S. Low-frequency distributed acoustic sensing shape factors for fracture front detection[J]. *Interpretation*, 2023, 11(2): SB11-SB20.
- [20] LEGGETT S, CHEN Ming. Evaluation of a rapid diagnostic tool to estimate geometry evolution of multiple simultaneously propagating fractures from cross-well fiber optic strain measurements[R]. SPE 217820, 2024.
- [21] LIU Yongzan, LIANG Lin, ZEROUG S. Inference of intermittent hydraulic fracture tip advancement through inversion of low-frequency distributed acoustic sensing data[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024: 1-17.
- [22] CROUCH S L, STARFIELD A M. Boundary element methods in solid mechanics; with applications in rock mechanics and geological engineering[M]. London, Boston: Allen & Unwin, 1983.
- [23] 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(4): 371-387.
SUI Weibo, LIU Rongquan, CUI Kai. Application and research progress of distributed optical fiber acoustic sensing monitoring for hydraulic fracturing[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2021, 51(4): 371-387.
- [24] SNEDDON I N, ELLIOT H A. The opening of a Griffith crack under internal pressure[J]. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1946, 4(3): 262-267.
- [25] DETOURNAY E. Mechanics of hydraulic fractures[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2016, 48: 311-339.
- [26] DONTSOV E V. Morphology of multiple constant height hydraulic fractures versus propagation regime [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2022, 46(6): 1177-1183.
- [27] CHEN Ming, ZHANG Shicheng, LI Sihai, et al. An explicit algorithm for modeling planar 3D hydraulic fracture growth based on a super-time-stepping method[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, 191/192(1): 370-389.
- [28] 唐焕文, 秦学志. 实用最优化方法[M]. 2版. 大连: 大连理工大学出版社, 2000.
TANG Huanwen, Qin Xuezhi. Practical methods of optimization [M]. 2nd ed. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2000.
- [29] LINDSEY N J, RADEMACHER H, AJO-FRANKLIN J B. On the broadband instrument response of fiber-optic DAS arrays [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(2): e2019JB018145.
- [30] JOHNSON D S, ARAGON C R, MCGEOCH L A, et al. Optimization by simulated annealing; an experimental evaluation; part I, graph partitioning[J]. *Operations research*, 1989, 37(6): 865-892.
- [31] 刘文岭, 韩大匡. 数字孪生油气藏: 智慧油气田建设的新方向[J]. *石油学报*, 2022, 43(10): 1450-1461.
LIU Wenling, HAN Dakuang. Digital twin system of oil and gas reservoirs: a new direction for smart oil and gas field construction [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(10): 1450-1461.