

大排列微地震实时监测技术在页岩油水力压裂中的应用

王磊¹, 万绪新¹, 史洪兵¹, 赵向东¹, 王琰琛¹, 唐春华^{*2}

(1. 中国石化胜利石油工程有限公司难动用项目管理中心, 山东东营 257000; 2. 北京鼎瑞科技有限公司, 北京 100080)

摘要: 页岩油是国家重要的战略资源。在中国, 以陆相页岩油为主, 特别是济阳凹陷, 页岩储层地质条件复杂, 常用的裂缝识别技术包括蚂蚁体、相干体和曲率体等, 无法满足精度要求, 开采面临巨大挑战。为了加快页岩油的开发, 在樊页1井组页岩油示范区开展基于大排列微地震实时监测, 通过闭环优化过程进行施工参数迭代和技术方案优化。根据微地震震源参数, 提出了计算储层改造体积和裂缝复杂性指数的新方法, 用于定量评估储层改造波及范围和裂缝的复杂性。文中主要描述了在樊页1井组页岩油示范区开展的基于大排列微地震实时监测技术的地质工程一体化实践, 所取得的认识和经验具有一定的借鉴价值。

关键词: 微地震, 储层改造体积, 估计最终可采储量, 裂缝复杂性指数, 套变

中图分类号: P631 文献标识码: A DOI: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2024.03.015

Application of large-array microseismic real-time monitoring technique in hydraulic fracturing of shale oil

WANG Lei¹, WAN Xuxin¹, SHI Hongbing¹, ZHAO Xiangdong¹, WANG Yanchen¹, TANG Chunhua²

(1. Management Center for Difficult-to-Handle Projects, SINOPEC Shengli Oil Engineering Co., Ltd., Dongying, Shandong 257000, China; 2. Beijing Peakluck Technology Co., Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract: Shale oil is an important strategic resource for the country. The main type of shale oil in China is continental shale oil, especially in the Jiyang Sag. The geological conditions of the shale reservoir are complex, and the commonly used fracture identification techniques, including ant tracking, coherence volume, and curvature volume, cannot meet the accuracy requirements, thus posing a huge challenge to exploitation. In order to accelerate the development of shale oil, large-array microseismic real-time microseismic monitoring technology has been deployed in the shale oil demonstration area of the Fanye 1 well group, and construction parameter iteration and technical scheme optimization are carried out through closed-loop optimization. A new method for stimulated reservoir volume (SRV) and fracture complexity index (FCI) based on microseismic source parameters was proposed to quantitatively evaluate reservoir stimulation and hydraulic fracture. This article mainly describes the geological engineering integration practice based on large-array microseismic real-time monitoring technique in the shale oil demonstration area of the Fanye 1 well group. The obtained knowledge and experience have a valuable reference.

Keywords: microseismic, stimulated reservoir volume (SRV), estimated ultimate recovery (EUR), fracture complexity index (FCI), casing deformation

王磊, 万绪新, 史洪兵, 等. 大排列微地震实时监测技术在页岩油水力压裂中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2024, 59(3): 523-532.

WANG Lei, WAN Xuxin, SHI Hongbing, et al. Application of large-array microseismic real-time monitoring technique in hydraulic fracturing of shale oil[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2024, 59(3): 523-532.

0 引言

随着石油天然气勘探开发储层深度的不断增加,

导致井下微地震监测设备在耐温、耐压、工作寿命等方面问题日益突出。为此, 美国 Microseismic 公司的 Duncan 等^[1]提出采用三维地震勘探类似的大排列地面微地震监测方法。该方法通过在地表布设大量的

* 北京市海淀区苏州街1号8层北京鼎瑞科技有限公司, 100080。Email: 1192251206@qq.com

本文于2023年4月12日收到, 最终修改稿于2024年1月8日收到。

地震传感器,实时监测压裂过程中的微地震信号,通过信号的时间和空间分布,推断出裂缝的形态和分布情况,并进行压裂效果的实时评估。该技术具有覆盖范围广、频带宽、实时性好、操作简便等特点,在北美页岩油水力压裂中被广泛应用。

地表监测相对于井下监测,最明显的优势是不需要观测井。通常情况下,找到一个合适的观测井很困难;另外,井下微地震监测的有效范围虽然取决于当地条件,但大多数人认为观测距离应小于 1000 m。与此相比,地面大排列可以很容易地部署到更大的区域,甚至是整个区域,只需一次部署即可全部覆盖。在数据处理方面,为了提高微地震弱信号的定位精度,Kao 等^[2]提出震源扫描算法,即将各道的微地震信号进行偏移叠加,以期获得高信噪比的定位结果。

本文首先介绍了樊页 1 井组页岩油示范区的地质条件和大排列微地震实时监测技术;然后重点描述了在示范区开展的基于大排列微地震实时监测技术的地质工程一体化实践,具体包括压裂闭环优化、断缝体斜交缝工艺评估、断层与套损的关系、天然裂缝对施工压力和产能的影响;最后明确给出了根据微地震震源参数计算预测最终可采储量 (Estimated Ultimate Recovery, EUR) 的公式,并且提出了新的裂缝复杂性指数 (Fracture Complexity Index, FCI) 的计算方法。

1 樊页 1 井组基本情况

樊页 1 井组页岩油示范区位于济阳拗陷,共设计部署 8 口水平井,水平段长为 1348~2273 m,设计分 252 段进行压裂。由于对樊页 1 井组页岩油藏天然裂缝的描述和对复杂裂缝网络的形成机制认识欠缺,使得在数值计算中难以对缝网相关参数进行理论上合理的假设,直接影响了施工优化设计的合理性及压后产能评价的准确性。微地震监测技术能够评价压裂后的裂缝形态和规模,对于指导水平井设计及压裂方案的优化可起到非常积极的作用。因此为获取页岩层水力压裂诱导裂缝导流能力、几何形态、复杂性、展布方位以及储层改造体积等诸多参数,评价压裂方案和工艺技术的针对性和有效性,指导探区内页岩油藏下步勘探评价和钻完井及井下工艺技术的应用,开展了大排列微地震实时监测。

野外施工中首次使用 428XL 仪器进行大排列微

地震监测。图 1 是樊页 1 井组大排列微地震观测系统示意图。该系统采用 11 条测线散射状布设在大约 36 km² 的地面上,最短测线长度为 2820 m,最长为 3600 m,总共 1200 道,道间距为 30 m,每道使用 12 只检波器串联以提升抗噪能力。压裂井水平段位于北东方向,检波器阵列也主要集中在该方向。

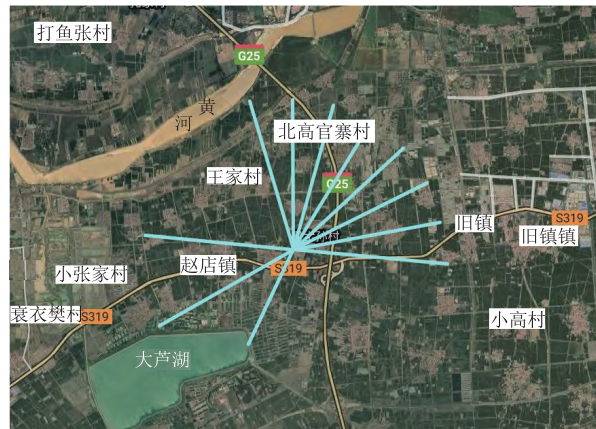


图 1 大排列微地震观测系统布设图
青色线条表示地面检波器阵列。

2 震源扫描定位原理

通常微地震事件的能量较弱,地层的吸收导致地面接收的微地震信号进一步减弱。环境噪声复杂多样,包含人类活动噪声、压裂设备机械噪声等。此外,还有一些非线性时变随机干扰,如仪器设备自身的电子噪声干扰、微地震反射波、绕射波等干扰。这些因素都对微地震监测造成了一定的困难。在樊页 1 井组区采集的典型微地震信号如图 2 所示。为了克服上述地面微地震监测的不利因素影响,Kao 等^[2]提出了震源扫描算法,即将各道信号进行偏移叠加以期获得信噪比较高的定位结果。

如图 3 所示,震源扫描算法是一种针对弱信号微地震精确定位的反演算法,其本质是一种逆时偏移定位技术^[3]。类似于地震勘探中共深度点叠加的速度扫描算法,该方法同时对震源位置和发震时刻进行搜索,以高信噪比和强的叠加能量为准则,通过成像函数使有效信号加强、干扰信号减弱,计算出相应网格的亮度值。判决函数将亮度最大值与预设阈值进行对比,如果超过阈值则将该处判定为震源位置。 τ_{\max} 是亮度最大值所对应的发震时刻。

假设一个微地震事件被一个有 N 个检波器的台

阵记录。首先将这些记录归一化,然后计算亮度值

$$b(\boldsymbol{\eta}, \tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |u_n(\tau + t_{\eta n})| \quad (1)$$

式中: u_n 为第 n 个台站的归一化波形; $t_{\eta n}$ 为假定的震源位置 $\boldsymbol{\eta}$ 与第 n 个台站间的理论走时; τ 为发震时刻。理论上,如果 $(\boldsymbol{\eta}, \tau)$ 对应的是真实的震源,则所有的 $|u_n(\tau + t_{\eta n})| = 1$,因此 $b(\boldsymbol{\eta}, \tau) = 1$ 。事实上由于速度误差,此种情况是不可能的,而且计算的理论走时很难刚好在对应波形的振幅最大处,因此需要在理论走时的附近选取一个时窗进行叠加

$$b(\boldsymbol{\eta}, \tau) = \frac{\sum_{m=-M}^M \omega_m \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |u_n(\tau + t_{\eta n} + m\Delta t)| \right]^2}{\sum_{m=-M}^M \omega_m} \quad (2)$$

式中: $2M$ 是时窗长度,通常为一个周期左右; Δt 为采样间隔; ω_m 是权重因子,通常根据旅行时和波形能量估算。

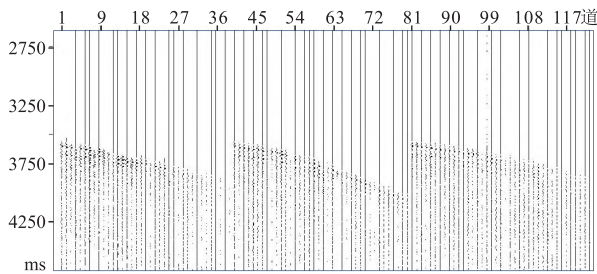


图 2 樊页 1 井组典型微地震波形记录

为确定震源位置,须用相干法检测每个网格单元。计算过程中,对检波器接收到的有效时窗内的信号进行偏移叠加,求出叠加后波形振幅的平方和(或地震波的能量)。将可能产生微地震的三维空间区域网格化成若干单元,初始设置大尺寸搜索网格,如果某一网络计算的的能量值接近全局搜索空间的最大值,则在该网格所在区域自动产生更小的网格,不断迭代直到预设的定位精度,获得微地震事件的位置。

针对大排列微地震观测系统的数据质量评估, Vlček 等^[4]定义了叠加增强比(Stacking Enhancement Ratio, SER)的概念

$$SER = H(\boldsymbol{\eta}, \tau) / H_0 \quad (3)$$

$$H(\boldsymbol{\eta}, \tau) = \max \{ b(\boldsymbol{\eta}, \tau) \} \quad (4)$$

式中: $H(\boldsymbol{\eta}, \tau)$ 是偏移叠加后最大能量; H_0 是不偏移直接叠加后的能量。SER 能有效地筛选信号。一般来说,噪声的 SER 值接近 1,有一些 SER 小于 1 的信

号可能来自同步的脉冲干扰;真实的微震事件一般 SER 值远大于 1。SER 是描述震源扫描成像质量好和判别微地震能量强弱的一个重要参数,努力改善接收条件、采用有效的数字滤波方法削弱干扰波、提高 SER 是整个大排列微地震工作的首要任务。

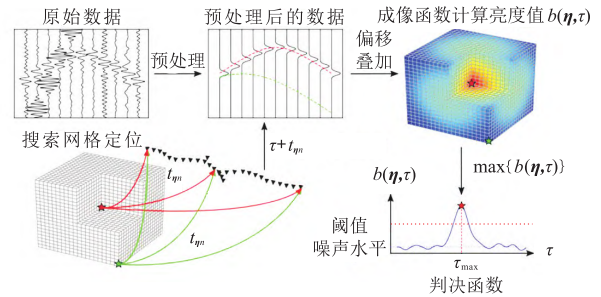


图 3 震源扫描算法原理示意图

由于震源扫描算法复杂,需要占用大量的 CPU 时间。因此,在樊页 1 井组实时监测过程中,根据定位的微地震数据质量评价结果,动态调整震源扫描算法的判决阈值,从而确保微地震定位结果的时效性和定位精度。

3 压裂闭环优化过程

风险管理要求在进行页岩油开发过程中需要对一定比例的压裂井进行测量,从而实现闭环优化,如图 4 所示。其中“闭环”是指通过实时监测压裂效果来不断调整和优化压裂参数,实现压裂效果的最优化。该过程通常涉及使用各种技术和设备进行数据采集和处理,例如微地震监测、压力测试和流量监测等,以获取实时的地层和井筒信息,从而实时调整压裂参数,最大限度地提高产能和经济效益,同时降低环境影响和风险。

在项目实施过程中,首先通过樊页 1 井组及周边井实钻资料,建立涵盖三维构造模型、属性模型、天然裂缝模型、地质力学模型、压裂拟合模型等井组压裂分析模型,根据压前水力裂缝模拟进行压裂风险预判,提出方案优化意见;然后在压裂过程中,利用微地震技术和压力分析平台实时监控压裂参数,分析裂缝延伸情况,根据设计要求提供动态优化建议;压后进行施工分析,评价裂缝几何形态和裂缝复杂性,提出下段施工建议。通过闭环优化持续迭代地进行施工参数迭代和技术方案优化,迅速积累对页岩油开采的认识和经验,实现“精细压裂设计、压裂实时分析、过

程控制、效果深化评价”的目标。

微地震监测技术是地质工程一体化的桥梁和纽带,也是评估压裂施工参数的有效测量手段。应用压裂施工过程中的实时微地震监测与分析技术,可以诊断和分析裂缝的动态延伸和支撑剂的运移分布,认识和研究储层特性,分析和评估现场压裂液性能和实际施工质量,减小施工风险,保证施工按设计要求顺利进行^[5]。

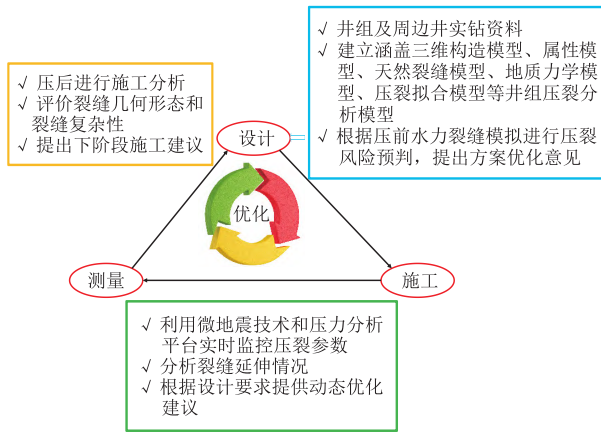


图4 压裂闭环优化过程示意图

如图5所示,通过樊页1井组缝网长度、宽度、高度、储层改造体积和总液量、总砂量的相关性研究,可以得到不同施工参数条件下微地震监测的缝网响应特征:缝网长度和液量有较强相关性,而储层改造体积和液量、砂量都相关^[6]。评估施工规模、施工排量等压裂工程参数,开展压裂参数对比和优化,寻找最优的压裂施工参数组合和主控因素,是精细化储层改造成功与否的关键因素^[7]。

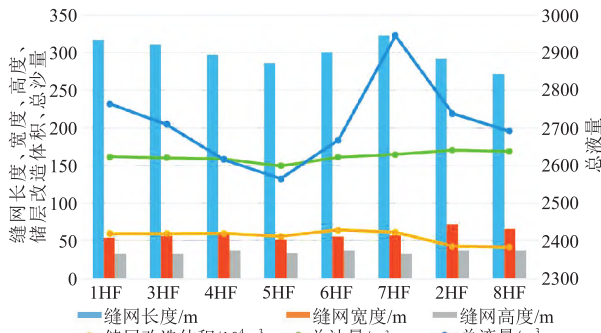


图5 樊页1井组缝网参数与压裂施工参数相关性对比

如图6所示,红色箭头所示为最小井间距,微地震结果在椭圆所示区域有重复压裂的情况出现。5HF井和6HF井的间距较小为345m,导致两井主裂缝之间的改造区局部重叠,降低了压裂改造效率;

4HF井和8HF井的间距过大,导致两井主裂缝之间存在未改造区域,影响储层的动用程度。由此可见,水平井分段压裂时的井间距对储层的压裂改造效果具有重要影响。

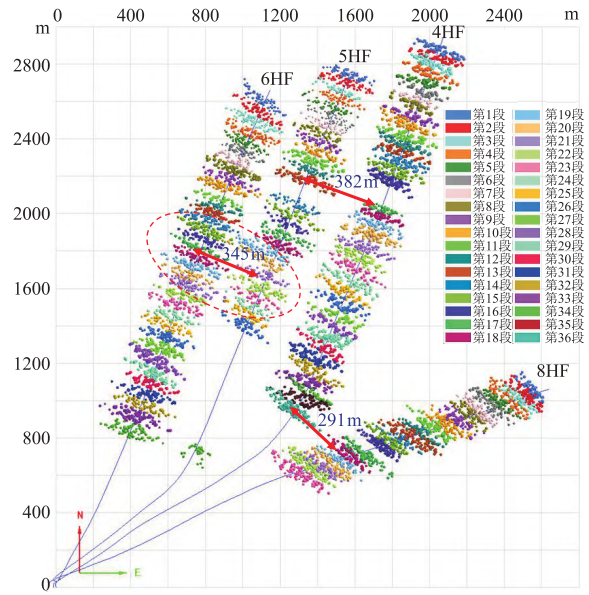


图6 樊页1井组四口井微地震定位结果与井间距分析

4 断缝体斜交缝工艺评估

通常将与褶皱、断层有关的裂缝和岩石孔隙结合所形成的不规则分布的、具有一定规模的、孔渗性能较好的地质体或地质单元视为一种新的储集体类型,称之为“断缝体”^[8]。断缝有效沟通源岩,油气可沿断裂垂向或侧向运移进入高渗的断缝体,在上覆油页岩、泥岩等盖层封堵及泥岩、致密砂岩的侧向遮挡下,形成断缝体油藏。其特征主要表现:在“断缝体”内部,断层及与断层有关的中高角度裂缝(倾角大于30°)比较发育;“断缝体”内部孔渗性能较好,是油气聚集的有利部位^[9]。

前期研究发现,2HF井和8HF井储层与4HF井、5HF井、6HF井、7HF井明显不同,属于典型的断缝体。因为拉张断裂、伴生剪切滑移,2HF井和8HF井应力场方向发生变化。4HF井、5HF井、6HF井、7HF井裂缝延伸方向与井眼轨迹近于垂直,为横向缝;而2HF井和8HF井裂缝延伸方向与井轨迹夹角约为60°~65°,这种斜交缝相比垂直缝,可以更加有效地切割页岩油储层中的细小裂隙,增加有效储层面积和排采通道,从而提高页岩油的采收率。图7为8HF

井和 7HF 井裂缝密度(单位体积内微地震事件点的个数)俯视图。8HF 井较 7HF 井近井事件多,裂缝密度大,表明 8HF 井近井裂缝连通性更好,改造效果更充分,但同等条件下缝网重叠较多,单段改造体积大但整体改造体积小。由此可见,大排列实时监测可用于对不同的压裂工艺和方案进行对比,选择适合储层改造的压裂工艺和施工参数,找出最优的水力压裂解决方案。

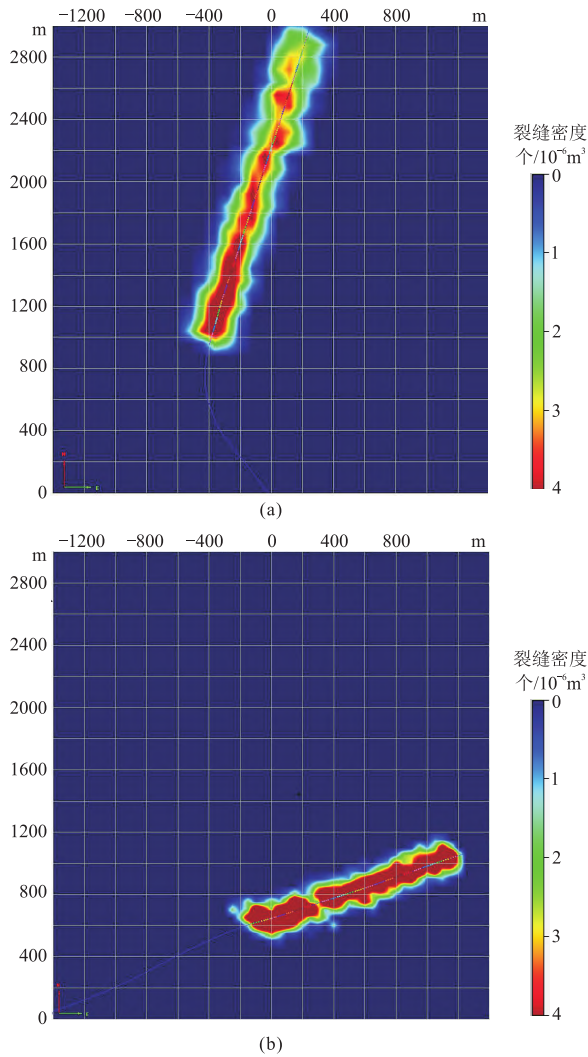


图7 7HF 井垂直缝(a)与8HF 井斜交缝(b)裂缝密度对比

5 断层与套损的关系

在页岩油压裂过程中,与四川盆地长宁、威远开发区页岩气类似,水平井的套管很容易发生变形和断裂^[10]。根据库伦—摩尔(Coulomb-Mohr)准则,套变是典型的剪切变形,符合剪切变形的力学机理,表明

套变是在水力压裂过程中流体压力传递到地层断层和天然裂缝诱发地层产生剪切滑移,从而引起地层对套管的不对称挤压造成的结果^[11]。综合分析 5HF 井底压力和示踪剂结果,发现压裂过程中孔隙压力升高引起的岩石拉张变形很难导致套损。但是当压裂液压力传递到断层和天然裂缝而使其达到剪切滑移条件时,断层和天然裂缝就会产生剪切滑移^[12]。断层面水平套管剪切损坏通常是围岩蠕滑挤压力和断层活化剪切力共同作用的结果^[13]。

在樊页 1 井组开发实践中,使用微地震活动追踪水力压裂过程中的套管和井眼形变,用于确定天然裂缝在套管和井眼轨迹中的延伸方向和深度。图 8a 为 5HF 井第 26 段压裂施工曲线;图 8b 为微地震事件视图。压裂开始,微地震事件出现在 5HF 井第 26 段附近(绿色);40 min 后油管压力缓慢大幅下降,同时 A 靶点附近产生微震事件(红色)。前期的地震资料也证明了 A 靶点附近存在尺度较大的断层。这充分说明套变是沿裂缝发生的剪切滑移造成。因此在页岩油开发生产实践中,控制压力突降,让压裂液造缝而不沿断层和天然裂缝流失是防治套变的根本措施,同时加强微地震监测,准确识别被激活的天然裂缝或断层。

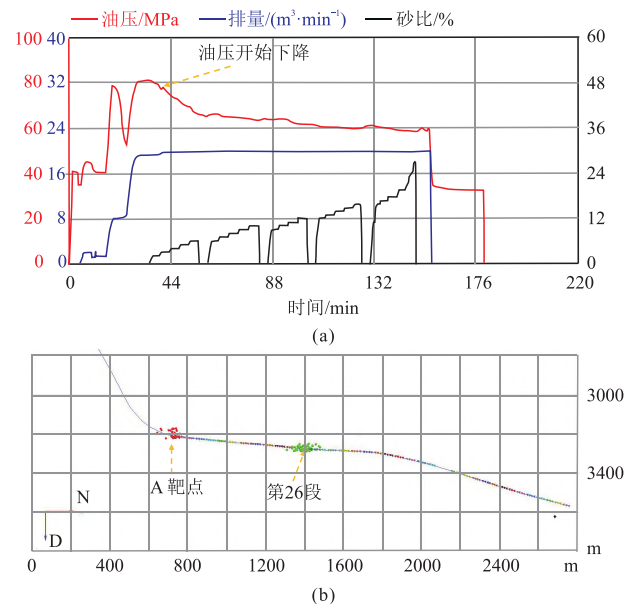


图8 5HF 井第 26 段压裂施工曲线(a)和微地震监测成果(b)

6 天然裂缝对施工压力和产能的影响

页岩压裂主要是针对油气显示较好区、裂缝区或

是具有较好脆性而易形成破碎带和裂缝的区,即油气甜点区。影响页岩甜点的因素有很多,包括页岩渗透率和孔隙度、有机碳含量、有机质成熟度、脆性矿物含量、应力差大小和岩石力学参数等,其中最重要因素是天然裂缝发育程度。体积压裂本质上也是通过在主裂缝上形成多条分支缝,沟通天然裂缝,最终形成复杂裂缝网络以实现储集层全方位改造,从而改善储集层整体渗流能力,以提高产量和延长生产有效期。

压裂施工过程中的压力突降主要分为井筒、工具和地层等多方面原因,其中断层和天然裂缝发育段的影响占比较高。天然裂缝是地质结构弱面,当水力裂缝与天然裂缝相遇时,水力裂缝将受天然裂缝影响^[14]。根据弹性力学理论,前人建立了水力裂缝与天然裂缝之间的相交作用准则及模型,可以准确分析水力裂缝相交天然裂缝后的扩展路径。水力裂缝可以直接穿过天然裂缝,而不改变方向(模型2);也有可能中断(模型1),或者沿天然裂缝分岔(模型3),这取决于天然裂缝的性质,以及最小水平主应力和外界压力。

6.1 模型1

模型1如图9a所示,水力裂缝与闭合的天然裂

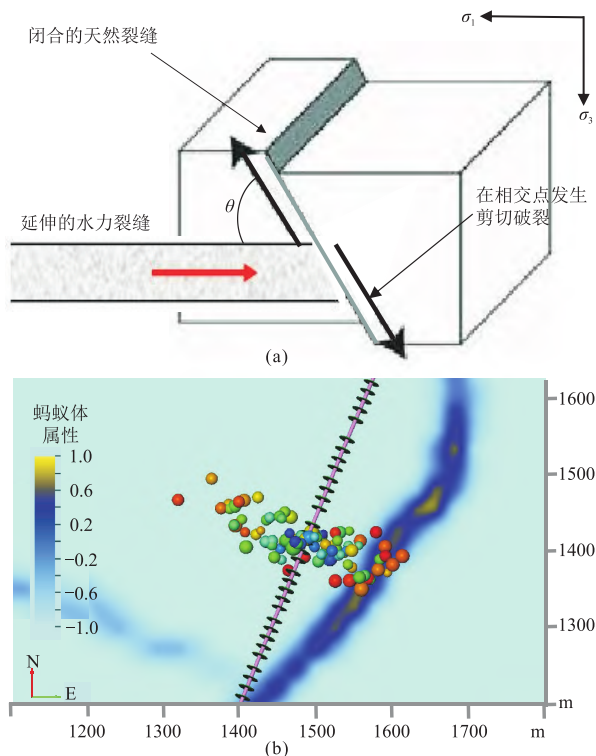


图9 模型1及实例

(a)水力裂缝沿天然裂缝延伸模型;(b)4HF井第29段微地震监测结果(背景为蚂蚁体属性)。 σ_1 和 σ_3 分别表示最大主应力和最小主应力, θ 为天然裂缝和水力裂缝的夹角。

缝相逢时,沿天然裂缝延伸。压裂前天然裂缝处于闭合状态,水力裂缝遇见天然裂缝后,天然裂缝在相交点发生剪切破裂,这种模式天然裂缝可能成为水力裂缝的障碍,阻止其进一步扩展,同时会造成压裂液的大量滤失。

以4HF井第29段压裂为例(图9b),蚂蚁体切片显示,东侧距压裂段100m附近有北东向天然裂缝。在压裂施工过程中,微地震监测结果显示,由于天然裂缝处于闭合状态,天然裂缝与水力裂缝在相交点发生剪切破裂,水力裂缝没有穿过天然裂缝。

在天然裂缝发生剪切破裂的同时,其他可能发生的作用模式就是水力裂缝穿过天然裂缝。如果该作用模式也不发生的话,就会导致水力裂缝的延伸存在暂时性的停顿。后面随着泵注的持续进行,交点处的流体压力将不断升高,最终交点处的流体压力将超过作用在天然裂缝面上的正应力,这时候天然裂缝处于张开状态,水力裂缝与天然裂缝之间的作用将转换为模型2-2和模型3。

6.2 模型2-1

天然裂缝处于闭合状态,水力裂缝从天然裂缝面直接穿过。水力裂缝穿过天然裂缝的条件为:①在天然裂缝另一侧面的破裂压力低于天然裂缝张开压力;②为了在天然裂缝面的另一边重新起裂,天然裂缝与水力裂缝交点处的流体压力必须克服应力加上岩石的抗张强度。

6.3 模型2-2

如图10a所示,天然裂缝处于张开状态,水力裂缝在相交点直接穿过天然裂缝,继续沿原方向(垂直最小主应力方向)延伸。需要满足在交点处从天然裂缝另一侧壁面起裂比从天然裂缝端部起裂更容易。

以6HF井第33段压裂为例(图10b),蚂蚁体切片显示,该段东侧50m附近有北东向天然裂缝。压裂微地震监测结果显示,天然裂缝处于张开状态,水力裂缝在相交点直接穿过天然裂缝,沿原方向即垂直最小主应力方向继续延伸。

6.4 模型3

如图11a所示,天然裂缝张开,水力裂缝沿天然裂缝走向延伸,从天然裂缝的端部破裂而转向,继续沿垂直最小主应力方向延伸。在天然裂缝张开后,要保证从天然裂缝的端部起裂,需要满足流体压力不能压开交点处另一侧壁面而同时又能压开天然裂缝的端部。

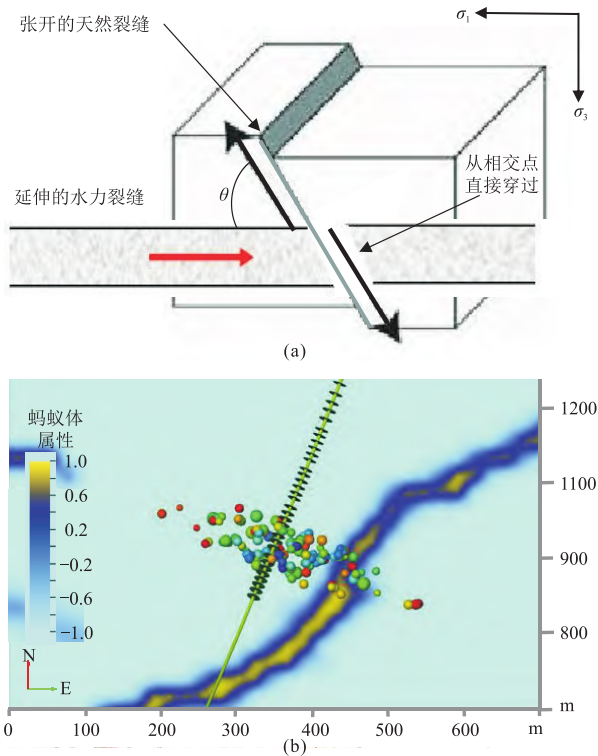


图 10 模型 2-2 及实例

(a)水力裂缝穿过天然裂缝模型; (b)6HF 井第 33 段微地震监测结果

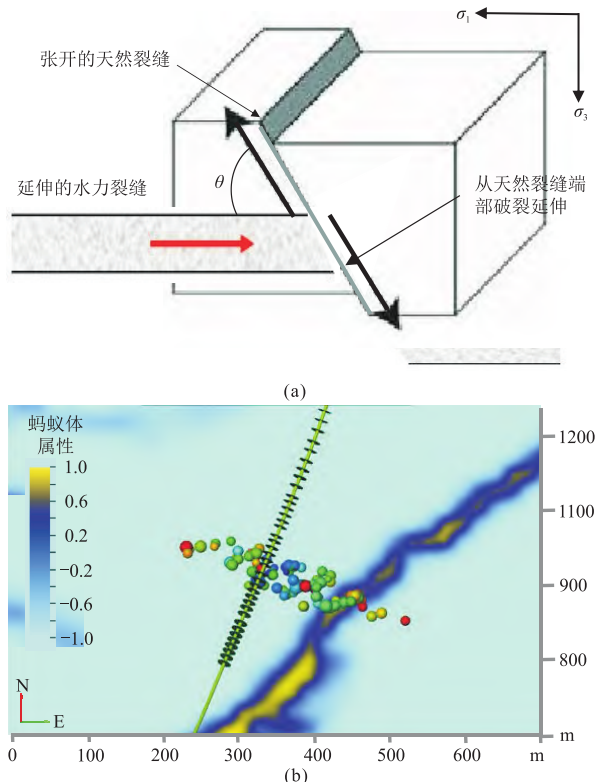


图 11 模型 3 及实例

(a)水力裂缝与天然裂缝交叉偏移模型;
(b)6HF 井第 32 段微地震监测结果

以 6HF 井第 32 段为例(图 11b),蚂蚁体切片显示该段东侧 40 m 附近有北东向天然裂缝。压裂微地震监测结果显示,由于天然裂缝处于张开状态,水力裂缝沿天然裂缝走向延伸,从天然裂缝的端部破裂而转向,继续沿垂直最小主应力方向延伸。

樊页 1 井组页岩油开发实践表明,天然裂缝的受力状态影响了天然裂缝的稳定性及其在水力压裂作业时与水力裂缝的相互作用。在压裂过程中,模型 1 所示天然裂缝容易造成压裂液的漏失进而引起砂堵,模型 2 和模型 3 对产量影响相对较大,起裂点包括天然裂缝面上潜在的薄弱点或其他易于应力集中区域,水力裂缝可在上述的起裂点重新起裂和扩展,提高了压裂效果和裂缝网络复杂程度。

7 预测最终可采储量

樊页 1 井组体积压裂以提高油井预测最终可采储量 (EUR) 为目标,以扩大储层改造体积 (Stimulated Reservoir Volume, SRV)、裂缝复杂程度及支撑裂缝导流能力为手段。通过对微地震事件的数量、分布和强度进行分析,确定储层中裂缝的密度和分布情况,计算 SRV。截止 2022 年 11 月 21 日,樊页 1 井组 8 口井累计产油 3.5×10^4 t,峰值日产油 501 t。

对于剪切性震源的微地震事件,其强度的标量地震矩为

$$M_0 = \mu A d \quad (5)$$

式中: μ 为剪切模量; A 为滑移面积; d 为平均滑动位移。面积和位移的乘积(也称为地震势)代表形变体积。 M_0 可以通过每一个微地震事件的波形估计

$$M_0 = \frac{4\pi\rho c^3 R\Omega_0}{F_c} \quad (6)$$

式中: ρ 为震源介质密度; c 为震源处 P 波速度; R 为 P 波振幅的自由表面放大系数; F_c 为 P 波的辐射系数; Ω_0 为低频幅值。

将 M_0 在三维空间网格化,取阈值在三维体内进行积分可求得 SRV。再用下式可以求得 EUR

$$EUR = R_F \frac{SRV\Phi(1 - S_w)}{B_0} \quad (7)$$

式中: R_F 为采收率; Φ 为孔隙度; S_w 为含水饱和度; B_0 是地层原油体积系数。

依据微地震数据估算的樊页 1 井组的 SRV、EUR 如图 12 所示,准确性有待今后的生产验证。

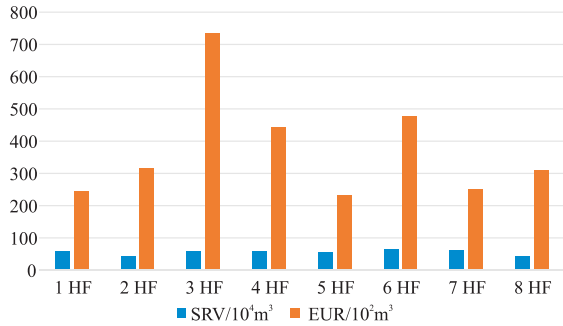


图 12 估算的樊页 1 井组 SRV 和 EUR

8 裂缝复杂性指数

裂缝复杂性指数 (Fracture Complex Index, FCI) 是指在水力压裂过程中形成的裂缝网络的复杂性程度。该指数综合考虑了裂缝的数量、长度、面积、体积、分支程度、分布密度、连通性等参数,用来反映裂缝的分支情况、缝宽和连接程度等。利用 FCI 可以评估水力压裂过程中裂缝的形成和扩展,并进一步优

化压裂参数。这对于提高页岩油的开采效率和经济效益具有重要意义。同时,FCI 还为非常规油气资源的开发提供了有价值的参考数据。

在使用微地震监测技术进行裂缝成像的研究中,可以通过计算微地震事件的分布和连通性估算 FCI。Cipolla 等^[15]将直井页岩压裂的 FCI 定义为微地震监测的缝网宽度与长度之比

$$FCI_o = \frac{W}{L} \quad (8)$$

式中: W 是垂直缝长方向压裂液波及范围的一半; L 为压裂造缝半长。在理想情况下,FCI 为 1; 裂缝为常规单一裂缝时接近于 0。

但是,该概念仅考虑了宏观裂缝的空间水平尺度,难以适应页岩水平井分段体积压裂的需要^[16]。为此,为了更准确地描述裂缝复杂性指数,本文提出了全新的计算方法,建立页岩油水平井分段压裂 FCI 的精确计算公式

$$FCI_n = FCI_o \times \frac{\sum_{i=1}^N M_{0i}}{V} \quad (9)$$

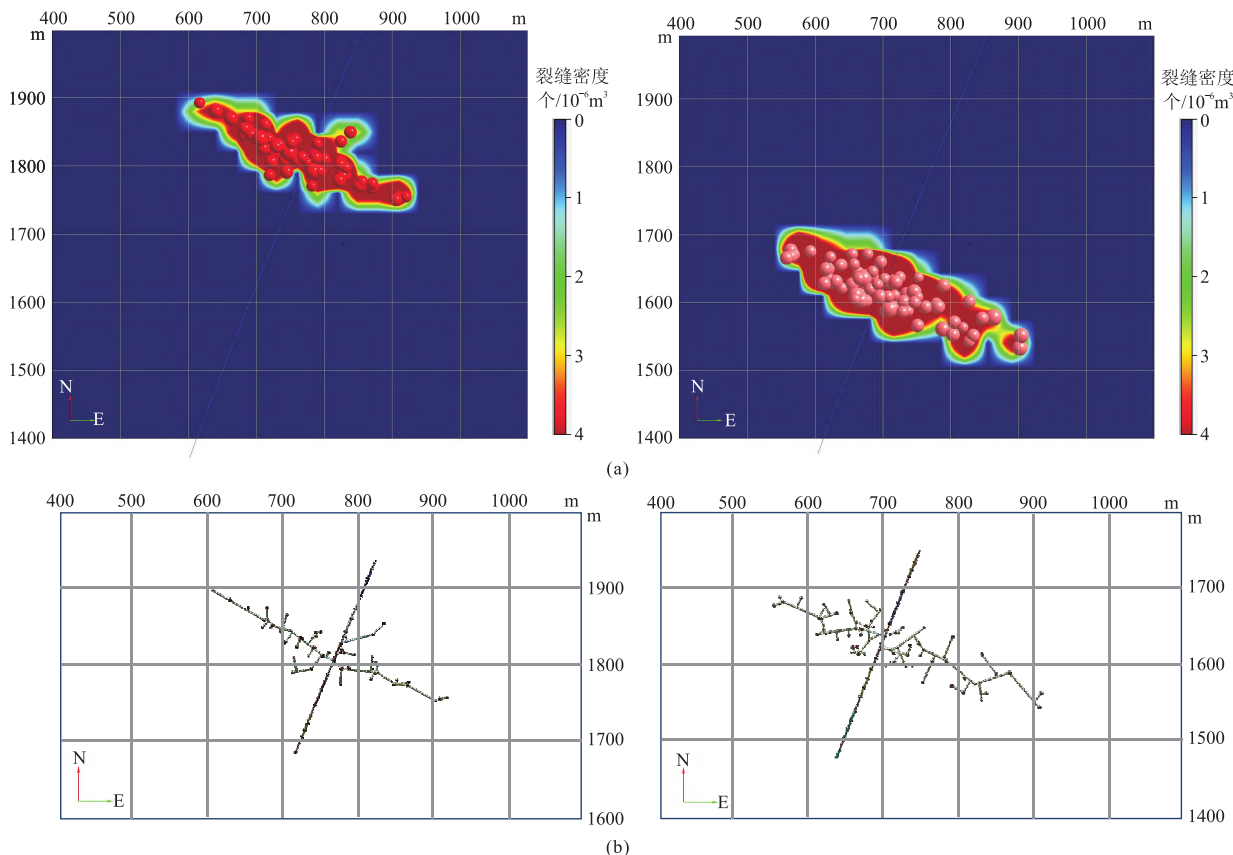


图 13 6HF 井第 17 段(左)和第 21 段(右)裂缝密度(a)与离散裂缝网络(b)对比

式中: FCI_n 为新的裂缝复杂指数,是 FCI_0 和地震形变密度之积; N 为微地震事件的数量; V 是PKN(Perkins-Kern-Nordgren)或KGD(Khristianovic-Geertsma-de Klerk)模型的体积;地震矩 M_0 可以通过式(6)计算获得。

由于地震矩是用来表示地震所释放出能量的大小,是表征地震强度和震源力学状态的基本参数之一,它与破裂过程的物理实质直接联系。地震矩体密度(地震形变密度)与造缝强度有很强的相关性。采用地震形变密度和 FCI_0 之积既能反映储层的宏观裂缝尺度又能反映微观造缝强度。根据式(9), FCI_n 的值越大,储层改造强度越剧烈、越充分;反之, FCI_n 的值越小,储层改造强度越弱、越不充分。

6HF井第17段和第21段的 FCI_0 值相差很小;但第17段的 FCI_n 为 3.1×10^6 ,第21段的 FCI_n 为 20.3×10^6 ,相差很大。如图13所示,其密度平面俯视图和离散裂缝网络图均表明,第21段缝网连通性更好,形成了多条分支缝;而第17段缝网连通性较差,以主缝发育为主。

9 结论和建议

本文通过大排列微地震实时监测技术在樊页1井组压裂施工中的应用和效果分析,得出如下几点认识和结论。

(1)微地震监测技术能够实时准确地反映压裂裂缝扩展形态及特征,客观评价压裂改造效果。通过闭环优化,精细控制压裂参数(缝网几何对称性、簇间距、段间距、井间距等),评估不同工艺的有效性,有效指导现场压裂施工。

(2)天然裂缝作为页岩油的运移通道和储集空间,对页岩油产能起建设性作用。通过实时微地震监测天然裂缝对压裂施工和效果的影响,充分利用天然裂缝的有利属性提高压裂设计方案的针对性及改造效果,尽可能降低天然裂缝对套变的负面影响,具有重要的现实意义。针对断缝体的斜交缝开发工艺改造可以在裂缝簇内相互交织,形成更多的通道和孔隙,从而提高油气的采集效率。

(3)裂缝复杂性指数(FCI)是衡量裂缝形态、分布和连通性等参数的一个综合指标。本文提出了采用微地震形变密度和 FCI_0 计算FCI,解决了水平井裂缝复杂性指数量化的准确性难题。

(4)页岩油的勘探开发总体上仍处于初级阶段,未来发展前景巨大,当务之急是继续加强微地震和地质工程一体化技术的综合研究工作。通过以地震和微地震的联合解释为基本导向的地质工程一体化技术,对影响页岩油储层产量的因素进行综合分析,厘清主要的影响因素,建立更加合理的工作流程,以实现技术和效益的双提高。

参考文献

- [1] DUNCAN P, LAKINGS J. Microseismic monitoring with a surface array[C]. Extended Abstracts of First EAGE Passive Seismic Workshop: Exploration and Monitoring Applications, 2006, cp-21-00028.
- [2] KAO H, SHAN S J. The source-scanning algorithm: mapping the distribution of seismic sources in time and space[J]. Geophysical Journal International, 2004, 157(2):589-594.
- [3] 毛庆辉,陈君武,王鹏,等. 基于优化波形叠加的井中微地震定位方法[J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(5):1164-1172.
- [4] MAO Qinghui, CHEN Junwu, WANG Peng, et al. Downhole microseismic location method based on waveform stacking optimization[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(5):1164-1172.
- [5] VLČEK J, FISCHER T, VILHELM J. Back-projection stacking of P- and S-waves to determine location and focal mechanism of microseismic events recorded by a surface array[J]. Geophysical Prospecting, 2016, 64(6):1428-1440.
- [6] 衡峰,王刚,刘博,等. 应用微地震监测技术研究不同簇间距压裂效果[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(增刊2):137-142.
- [7] HENG Feng, WANG Gang, LIU Bo, et al. Hydraulic fracturing with different cluster spacing based on microseismic monitoring[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(S2):137-142.
- [8] 徐刚,李德旗,王适择. 微地震监测在地震地质工程一体化中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(增刊2):115-123.
- [9] XU Gang, LI Deqi, WANG Shize, et al. Microseismic monitoring in seismic and geology integration[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(S2):115-123.
- [10] 赵福豪,黄维安,雍锐,等. 地质工程一体化研究与应用现状[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(2):131-138.
- [11] ZHAO Fuhao, HUANG Weian, YONG Rui, et al. Research and application status of geology-engineering integration[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(2):131-138.
- [12] 黄仁春,刘若冰,刘明,等. 川东北通江一马路背地区须家河组断缝体储层特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4):873-883.
- [13] HUANG Renchun, LIU Ruobing, LIU Ming, et al. Characteristics and genesis of fault-fracture reservoirs in the Xujiache Formation, Tongjiang-Malubei area, northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology,

- 2021, 42(4):873-883
- [9] 刘振峰, 刘忠群, 郭元岭, 等. “断缝体”概念、地质模式及其在裂缝预测中的应用——以四川盆地川西坳陷新场地区须家河组二段致密砂岩气藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4):973-980.
LIU Zhenfeng, LIU Zhongqun, GUO Yuanling, et al. Concept and geological model of fault-fracture reservoir and their application in seismic fracture prediction: A case study on the Xu 2 Member tight sandstone gas pool in Xinchang area, Western Sichuan Depression in Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 973-980.
- [10] 李凡华, 董凯, 付盼, 等. 页岩气水平井大型体积压裂套损预测和控制方法[J]. 天然气工业, 2019, 39(4): 69-75.
LI Fanhua, DONG Kai, FU Pan, et al. Prediction and control of casing damage in large volume fracturing of horizontal gas wells[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(4):69-75.
- [11] 李凡华, 乔磊, 田中兰, 等. 威远页岩气水平井压裂套变原因分析[J]. 石油钻采工程, 2019, 41(6):734-738.
LI Fanhua, QIAO Lei, TIAN Zhonglan, et al. Analysis on the causes of casing deformation in fractured shale-gas horizontal wells of Weiyuan Block[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(6):734-738.
- [12] 张鑫, 李军, 张慧, 等. 威荣区块深层页岩气井套管变形失效分析[J]. 钻采工艺, 2021, 44(1):23-27.
ZHANG Xin, LI Jun, ZHANG Hui, et al. Analysis on casing deformation failure in deep shale gas wells in Weirong shale gas play[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 44(1):23-27.
- [13] 陈朝伟, 张浩哲, 周小金, 等. 四川长宁页岩气套管变形井微地震特征分析[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(6):1286-1292.
CHEN Zhaowei, ZHANG Haozhe, ZHOU Xiaojin, et al. Microseismic characteristics of shale gas wells with casing deformation in Changning, Sichuan[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(6):1286-1292
- [14] 李彦鹏, 王熙明, 徐刚. 非常规储层水力压裂微地震成像[M]. 北京:石油工业出版社, 2015.
- [15] CIPOLLA C L, WARPINSKI N R, MAYERHOFER M J. The relationship between fracture complexity reservoir properties and fracture treatment design[J]. SPE Production & Operations, 2010, 25(4):438-452.
- [16] 魏旭, 张永平, 薄云鹤, 等. 离散裂缝网络建模技术在大庆油区泥岩裂缝性油气藏的应用浅析[J]. 油气藏评价与开发, 2018, 8(4):11-16.
WEI Xu, ZHANG Yongping, BO Yunhe, et al. Application of discrete fracture network modeling technology in mudstone fractured reservoir in Daqing oil region[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(4):11-16.

(本文编辑:宜明理)

作者简介



王磊 高级工程师, 1974年生; 1996年获石油大学(华东)应用化学专业理学学士学位, 2005年获中国石油大学(华东)计算机软件与理论专业理学硕士学位; 现就职于中国石化胜利石油工程有限公司难动用项目管理中心, 主要从事低渗透油藏整体压裂、重复压裂、仿水平井压裂等技术的研究; 曾获省部级科技进步奖多项、发明专利1项、实用新型专利1项。