

焦石坝区块分段压裂井中微地震实时监测技术

高东伟^{1,2}, 赵志红², 张晗¹, 李婷¹

- 1. 中石化重庆涪陵页岩气勘探开发有限公司 重庆 408014
- 2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室·西南石油大学 四川成都 610500

通讯作者: Email: gaodongwei@qq.com
项目支持: 国家科技重大专项“涪陵页岩气开发示范工程”(2016ZX05060)

引用: 高东伟, 赵志红, 张晗, 等. 焦石坝区块分段压裂井中微地震实时监测技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(5): 42-49.
Cite: GAO Dongwei, ZHAO Zhihong, ZHANG Han, et al. Micro-seismic real-time monitoring technology for staged fracturing wells in Jiaoshiba Block [J]. Well Testing, 2018, 27(5): 42-49.

摘要 随着涪陵页岩气田焦石坝区块开发的南移, 储层地质非均质性增强, 压裂工艺适应性逐渐变差, 常规微地震监测技术不能很好地实时优化压裂设计。自适应递归 STA/LTA 微地震事件检测和图像处边缘检测初至波自动拾取技术可进行微地震数据实时处理。结合焦页 AA-BB 井组井中微地震监测成果, 对邻井组 CC 井组方案设计时, 优化段间距、优选射孔位置、前置破裂提排量, 实时优化中后期暂堵转向工艺, 获得最优段间距为 35~40 m, 实现改造体积及效益最大化。现场试验表明, 通过焦页 CC 井组开发应用和验证, 焦页 CC 井组的归一化 1 500 m 水平段无阻流量明显高于焦页 AA-BB 井组, 其中焦页 CC-1HF 井与焦页 CC-4HF 井的无阻流量甚至大于 $50\times 10^4\text{ m}^3$ 。结果表明, 微地震监测技术对相似区域页岩气井压裂方案优化及现场实时工艺调整具有指导作用。

关键词 涪陵页岩气田; 微地震; 实时监测; 井工厂压裂; 方案优化; 射孔; 无阻流量
中图分类号: TE357 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.05.008

Micro-seismic real-time monitoring technology for staged fracturing wells in Jiaoshiba Block

GAO Dongwei^{1,2}, ZHAO Zhihong², ZHANG Han¹, LI Ting¹

- 1. SINOPEC Chongqing Fuling Shale Gas Exploration and Development Co. Ltd., Chongqing 408014, China
- 2. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

Abstract: With the southward development of the Jiaoshiba block in the Fuling shale gas field, the heterogeneity of the reservoir becomes stronger and the adaptability of fracturing technology gradually deteriorates, which led to conventional micro-seismic monitoring techniques that cannot optimize the fracturing design in real time. Adaptive recursive STA/LTA micro-seismic event detection and image edge detection first arrival wave automatic picking technology can process micro-seismic data in real time. Based on the micro-seismic monitoring data of Jiaoye well group AA-BB, this paper designs a corresponding scheme for the adjacent well group CC. This scheme optimizes the stage spacing and perforation position. Based on the real-time optimization of the temporary plugging steering technology in the middle and late stages, this paper, finally obtained the optimal stage spacing of 35-40 m, to achieve volume fracturing and maximize the benefits. Through the application and verification of the well group CC, the results show that the normalized open-flow capacity of the 1 500 m horizontal section of the well group CC is significantly higher than that of the well group AA-BB, and the open-flow capacity of well Jiaoye CC-1HF and Jiaoye CC-4HF even reaches $50\times 10^4\text{ m}^3$ or more. Which show that the micro-seismic monitoring technology has a guiding role in the optimization of fracturing schemes and real-time process adjustment in shale gas wells in similar areas.

Keywords: Fuling shale gas field; micro-seismic; real-time monitoring; well factory fracturing; scheme optimization; perforation; open flow capacity

资源勘探表明, 焦石坝区块拥有丰富的页岩气资源, 而其中大规模水力压裂技术是焦石坝页岩气开发的核心技术, 但该技术成本高, 并存在着改造效果不佳甚至无效的经济风险。因此, 有效监测和评估非常规储层压裂改造效果至关重要^[1-2]。调研发现, 目前评价压裂改造效果的主要方法有 Meyer

软件压后模拟和井下压力监测。Meyer 软件中的 MFrac 模块是基于离散裂缝网络等数学方法^[3-4],针对实时和回放数据进行模拟,从而对压后形成的裂缝网络(包括裂缝几何尺寸及 SRV)进行描述和评价,它的缺点在于该软件在模拟过程中是基于完井电测原始数据导入软件后,根据钻完井的基础数据和压裂的施工参数进行模拟的,以“一孔之见”来代表整个储层特征,未考虑到天然裂缝、平面的非均质性地质属性对压裂的影响^[5-6],模拟出的裂缝网络形态大同小异,不能反映压裂后的真实裂缝网络系统。井下压力监测是将压力计下入生产井,通过监测压裂期间的邻井井下的压力变化来定性评价压裂的干扰或井间连通情况、主要用于判断其对气井的干扰程度,不能评价压裂井压后的裂缝网络形态,因此这两种方法对页岩气水平井高效开发不具有指导意义。微地震监测技术可以实时从井中(或地面)监测非常规储层油气压裂改造过程,评估压裂效果,为优化压裂参数和改善压裂效果提供重要信息^[7]。经不断完善,微地震监测技术主要有地面测斜仪压裂监测、地面电位法裂缝监测、地面微地震监测、浅井组合监测和井中微地震监测等 5 种微地震监测技术^[8]。

目前,虽然国内外关于微地震监测技术应用在裂缝监测的研究较多,但针对实时监测技术的研究较少^[9-10]。本文将井中微地震实时监测技术应用到焦石坝区块的页岩气开发中,对水力压裂裂缝形态进行实时监测,并实时优化压裂方案,提高压裂效果。

1 井中微地震监测原理

微地震是指岩体破裂时动力波在岩体中传播时导致的震动现象。如图 1 所示,一般地,自然地震发生时地震波频率低于 50 Hz,高于 10 kHz 的破裂事件称为声发射,频率介于二者之间的破裂称为微地震事件^[11-12]。

从图 1 可以看出,在水力压裂过程中,地层受到来自与净压力成比例的极大应力,以及由裂缝内压力、地层压力之差引起并与之成比例的孔隙压力的变化^[13]。这两种变化都影响着在裂缝附近弱层理的稳定性(如天然裂缝,裂隙以及交互的层面),并使得它们能够剪切滑动^[14-15]。这种剪切滑动用微地震事件来描述。这些微地震发射出弹性波,可以通过精密的传感器在临井探测得到,进而通过数据采集及解释分析得到每个微地震事件的空间位置,

从而解释水力裂缝扩展的信息^[16-17]。

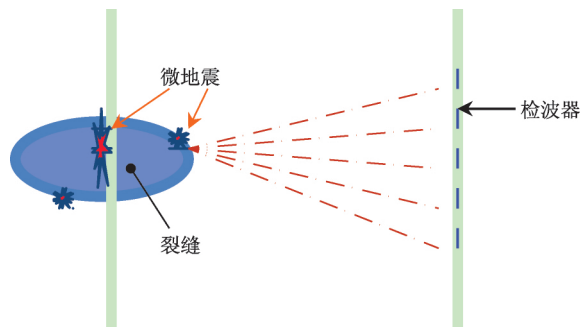


图 1 井中微地震监测示意图

Fig.1 Schematic diagram of micro-seismic monitoring in wells

2 微地震实时监测技术研究

井中微地震监测技术对压裂裂缝形态进行实时监测,实时确定工艺调整时机,从而避免工艺措施的盲目性,为提升压裂效果提供指导依据^[18-19]。本文通过自适应递归 STA/LTA 微地震事件检测和图像边缘检测初至波自动拾取技术,结合相干噪声压制和弱信号增强处理,实现了微地震监测资料实时自动化处理。

2.1 微地震事件检测技术

微地震事件检测技术主要包括基于数字图像处理的微地震事件检测方法和特征函数 STA/LTA 检测法。

2.1.1 基于数字图像处理的微地震事件检测方法

初至波的振幅相对于噪声信号而言较大且位于纯噪声信号和有效信号的分界处,反映在图像上就是在初至波附近有明显的灰度变化,从而可以应用数字图像处理技术中的边缘检测及边缘追踪的方法进行初至波自动拾取^[20]。

2.1.2 特征函数 STA/LTA 检测法

STA/LTA 方法是目前微地震事件判定常用的一种方法^[21],该方法实现简单、有效事件识别速度较快、适合地震数据的实时处理。

特征函数表达式为:

$$CF(i) = Y(i)^2 + K[Y(i) - Y(i-1)]^2 \quad (1)$$

$$K(i) = \frac{\text{SUM}|y(i)|}{\text{SUM}|y(i) - y(i-1)|} \quad (2)$$

$K(i)$ 是震幅和一阶导数的一个加权因子,通过加入这样的特征函数,在震幅和频率发生变化的时候,提高 STA/LTA 的比值对震幅和频率变化的敏感度,在震相到时的检测中,能够取得更为准确的监测结果。

2.2 裂缝参数及 SRV 计算

微地震解释及压裂评估,对随压裂施工过程中不断发生的破裂事件,分析其出现的空间展布、出现的速率与压裂施工曲线的对应关系,计算裂缝网络方位、长度、宽度、高度,并根据微地震事件出现的空间位置信息^[22],结合微地震事件的能量和时序属性,解释裂缝的连通性,估算储层有效改造体积(SRV),评估压裂效果。

本文采用贝叶斯反演理论^[23],设 G 为微地震到时观测数据, X 为待反演参数,模型误差与待反演参数的先验估计均为正态分布,对每条线反演求解,建立如下目标函数即可得贝叶斯最大后验解:

$$OB(X) = (F(X) - G)^T C_D^{-1} (F(X) - G) + \lambda^2 (X - X^P)^T C_M^{-1} (X - X^P)$$

(3)

式中: $F(X)$ 为模型结果; X^P 为参数的先验估计值; C_D 和 C_M 为模型误差与先验估计误差的协方差矩阵; λ 为权重系数。

目标函数 $S(X)$ 的求解,就是在数据拟合(第一项)和先验估计(第二项)之间寻求一种折衷^[24]。权重系数越大,反演解越接近先验估计;反之,反演解越接近于不稳定的原问题^[25-26]。

在无法确定观测数据噪声的情况下,采用 ABIC(赤池贝叶斯信息准则)来确定最佳权重系数^[27]。ABIC 的表达式为:

$$ABIC(\lambda) = N \ln[OB(X)] - \ln(\|\lambda C_M^{-1}\| - \ln(\|C_D^{-1}\| + \ln\|J^T C_D^{-1} J + \lambda C_M^{-1}\|) + \text{const}$$

(4)

式中: N 为 C_D 的维数; λ 为雅可比矩阵。

2.3 井中微地震实时监测可靠性验证

本文对比涪陵焦石坝区块同一时期井中微地震监测结果见表 1。从表 1 中可以看出,在相似的裂缝发育程度下,监测的微地震事件数量一致,且说明在相似地质条件下本井组监测的结果是准确可靠的。除此之外,本文通过井中微地震实时监测对焦页 AA-BB 井组 4 口井进行压裂监测,具体监测结果如图 2 和图 3 所示。

表 1 涪陵焦石坝区块不同井组井中微地震监测结果对比
Table 1 Comparison of micro-seismic monitoring results in different well groups in the Jiaoshiba block, Fuling

井组	裂缝发育情况	检波器观测距离/m	微地震事件总数	监测总段数	平均每段事件数
焦页 AA-BB	不发育	223~2 404	15 059	104	145
焦页 DD	不发育	160~700	4 597	31	148
焦页 EE	较发育	783~2 400	5 077	60	84
焦页 FF	较发育	890~2 140	3 283	34	96

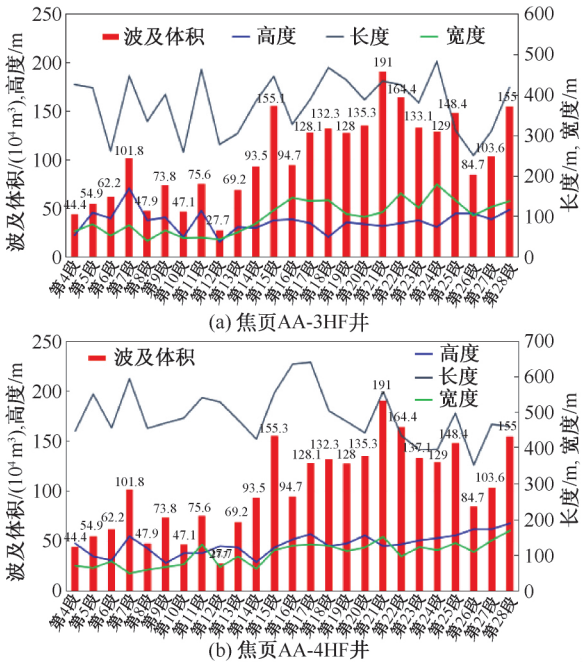


图 2 各段微地震监测缝网尺度及 SRV 对比图
Fig.2 Micro-seismic monitoring fracture-net size and SRV comparison map of each fracturing section

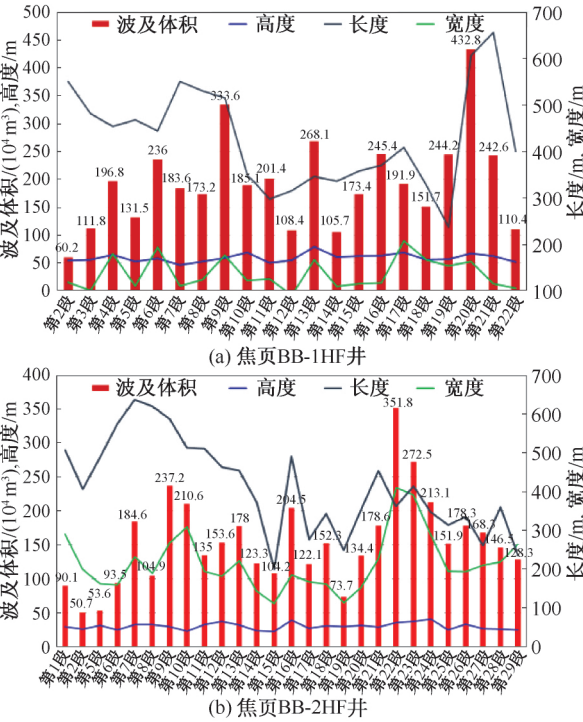


图 3 各段微地震监测缝网尺度及 SRV 对比图
Fig.3 Micro-seismic monitoring fracture-net size and SRV comparison map of each fracturing section

同时对水力裂缝的扩展进行实时评价,共定位有效微地震事件 15 059 个(图 4)。从图 2~4 看出,99.5%事件误差小于 10m,监测结果准确可靠。

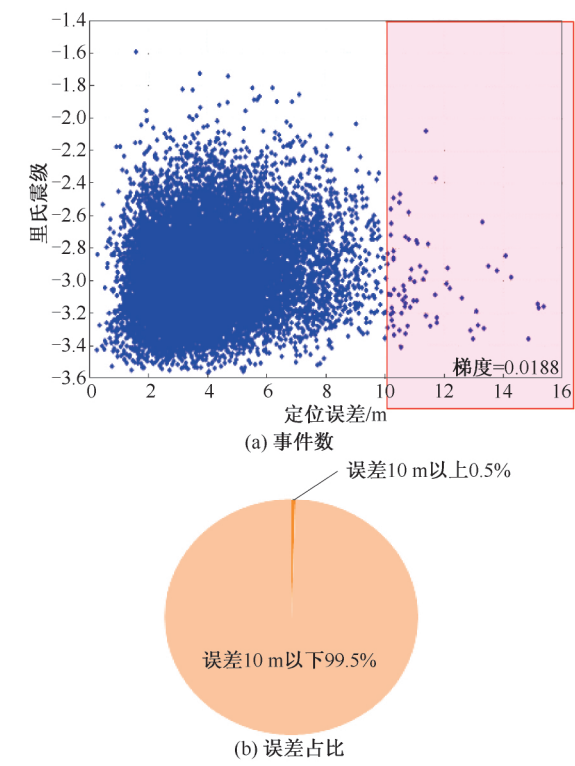


图 4 微地震监测全部事件点定位误差图
Fig.4 Positioning error map for all event of micro-seismic monitoring

3 优化措施及应用效果

应用微地震实时监测技术对焦石坝区块的页岩气水平井段间距、射孔位置、前置破裂提排量的方式、中后期暂堵转向工艺等进行实时优化指导。

3.1 适当放大段间距

通过对 AA、BB 井组段间距进行统计计算,发现多数井平均段间距在 30~35 m(图 5)。对压裂过程中出现的段与段之间的微地震事件重叠统计发现,AA、BB 井组重叠段落较多,重叠宽度在 30~139 m 不等,大多数宽度重叠在 50 m。

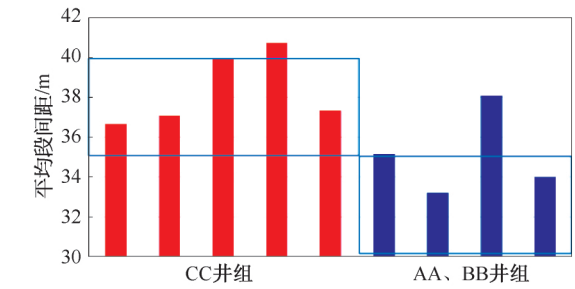


图 5 焦页 CC、AA、BB 井组单井平均段间距对比图
Fig.5 Comparison of average interval of single wells in well groups CC, AA and BB

以典型井 AA-3HF 井为例,在 $10\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 和 $14\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 两种工作制度下开展生产测井,相邻两段之间的改造体积重叠覆盖比例与各压裂段产气贡献率进行分析,如图 6 所示。

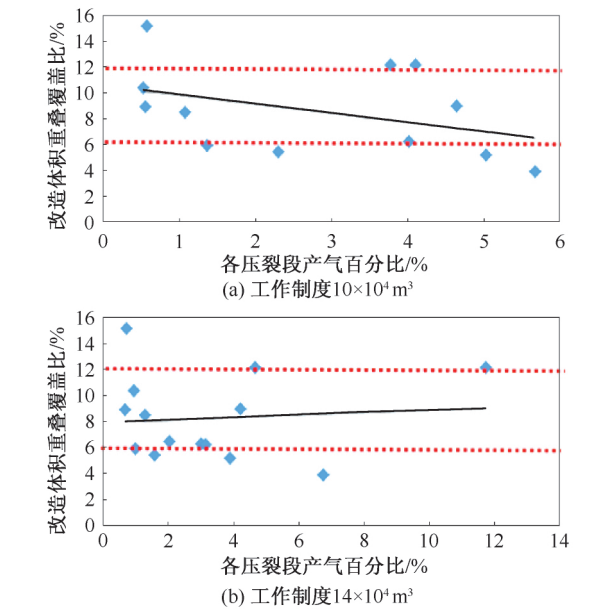


图 6 焦页 AA-3HF 井产剖测试结果与相邻两段之间的改造体积重叠覆盖比例关系图
Fig.6 Relationship between the test results of the production profile and the overlapping coverage ratio of the stimulating volume between two adjacent staged in well Jiaoye AA-3HP

从图 6 可以看出,改造体积重叠覆盖比例分布在 6%~12% 之间时,单段可获得相对较高的产气量,初步筛选后获得最优段间距为 35~40 m,因此在邻井组 CC 井组方案设计时,将井组内各井的平均段间距提高至 35~40 m(图 5)。

3.2 增加射孔位置优选的评价指标

水平井的段间距确定后,需要在水平段上选取射孔位置。焦石坝区块已形成“地质工程双甜点”射孔位置综合优选技术。具体的综合评价标准为:孔隙度 $\geq 4.0\%$, TOC $\geq 2.0\%$,石英体含量 $\geq 30\%$,密度 $< 2.65\text{ g/cm}^3$,同段不同簇综合应力差异小等。

监测发现,相邻压裂段 GR 值越高,监测到的微地震事件越少,SRV 也就越小;杨氏模量越大的区域,微地震事件越多,且容易产生裂缝^[28-29];在杨氏模量突变部位压裂时易产生层理裂缝(图 7)。

焦页 AA-BB 井组压裂结束后,在焦页 CC 井组射孔位置优选时,在以往综合评价标准的基础上,兼顾选取 GR 值低,杨氏模量高,同段同区域内 GR 和杨氏模量差异小的位置分簇射孔。

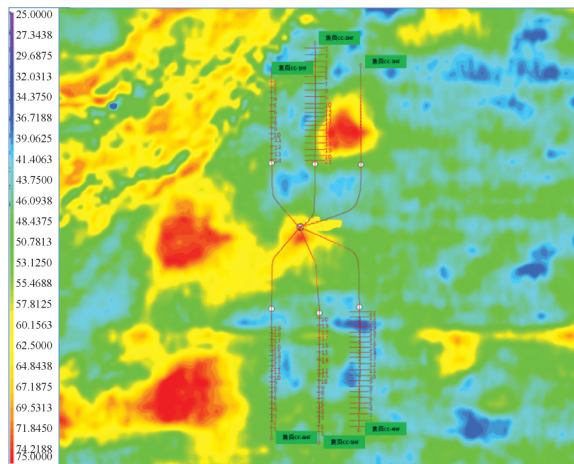


图7 焦页 CC 井组横向均一杨氏模量优选射孔位置图

Fig.7 Preferred perforation position map based on the transverse uniform Young's modulus of the well group-CC

3.3 优选前置破裂提排量的方式

在 CC 井组现场压裂施工中,针对储层穿行层位的不同,有针对性地选择快提排量和阶梯提排量的方式,压裂过程中见到了较好的效果。

焦页 CC-4HF 井主要穿行于①号小层,根据微地震监测启示,在本井施工过程中,针对该小层储层特征,现场施工主要采用了快提排量的方式,如图 8 所示。

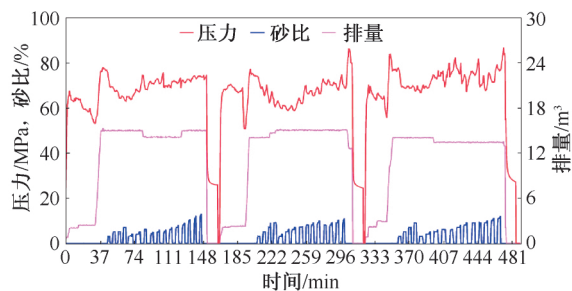


图8 焦页 CC-4HF 井穿行①号小层快提排量压裂曲线示范图

Fig.8 Demonstration diagram of fracturing curve with fast-improving displacement when the well Jiaoye CC-4HF passing through the No.1 layer

从图 8 可以看出,该井进行了前置预处理,整个压裂施工过程顺利,压裂加砂达到设计要求,压裂曲线也呈现出复杂化改造态势。

焦页 CC-1HF 井主要穿行于③号小层,根据微地震监测启示,在本井施工过程中,针对该小层储层特征,主要采用了阶梯提排量的方式,如图 9 所示。

从图 9 可以看出,该井进行前期预处理,整个压裂施工过程顺利完成,压裂加砂达到设计要求,压裂曲线也呈现出复杂化改造态势。

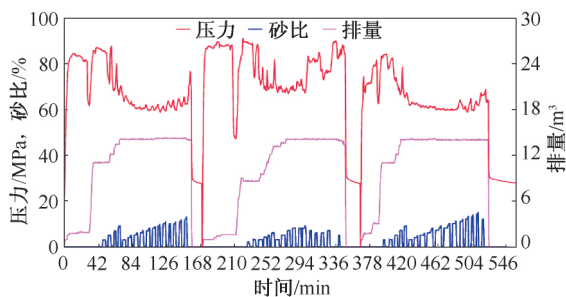


图9 焦页 CC-1HF 井穿行③号小层阶梯提排量压裂曲线示范图

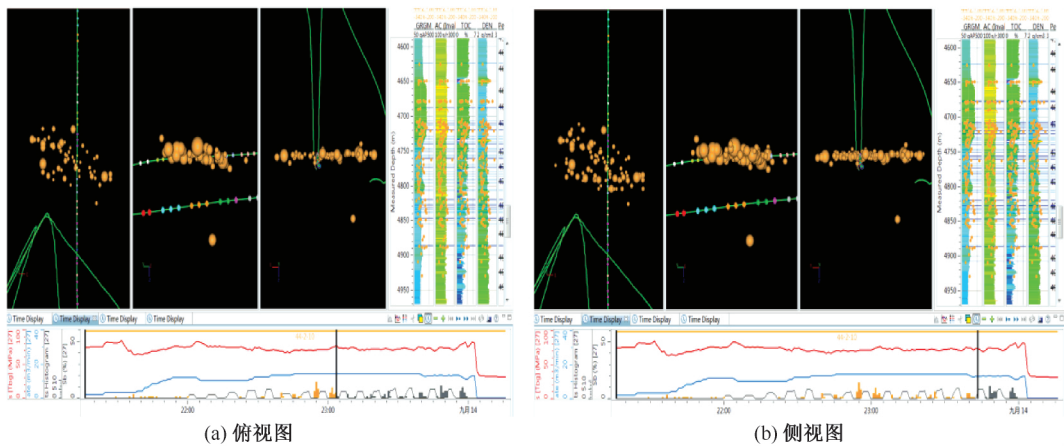
Fig.9 Demonstration diagram of fracturing curve with step-lifting displacement when well CC-1HF passing the No. 3 layer

3.4 实时优化中后期暂堵转向工艺

微地震事件数增长情况说明,可将 800~1 600 m^3 泵注阶段作为中途主动性进攻措施的最佳时机,在此阶段为了增加裂缝复杂程度,可以通过实施中后期暂堵转向工艺,在缝内实现微裂缝系统的人为封堵,憋起的净压力可以促使新裂缝的开启。焦石坝中期暂堵工艺主要有滑溜水粉陶段塞、胶液段塞及胶液粉陶段塞等,BB-CC 井组实时优化效果显著。

焦页 BB-2HF 井第 10 段在入井液液量为 1 065 m^3 时实施 1 次粉陶段塞中期暂堵工艺,其微地震事件点展布情况,如图 10 所示。其中,图 10(a)为实施中期暂堵工艺之前微地震事件点展布情况图;图 10(b)为入井液液量为 1 600 m^3 时微地震事件点展布情况图。两图对比可知,在暂堵前后,微地震事件点展布空间范围基本无变化,即缝网的长、宽、高保持不变,新增微地震事件点主要分布在原有裂缝网络中,且在暂堵后缝网东翼事件点数明显增多,而缝网西翼事件点鲜有增加,这说明暂堵工艺的实施有效的对西翼缝网进行了封堵,实现了东翼缝网的强化改造,并实现了原有缝网的复杂化,效果较好。

从焦页 CC-4HF 井第 19 段压裂记录曲线可以看出(图 11),在入井液液量为 941 m^3 时实施第 1 次胶液加粉陶段塞暂堵工艺,阶段泵入胶液 50 m^3 ,施工压力由 76.7 MPa 上升至 82.4 MPa,待胶液全部进入地层后,施工压力又回落至 76.7 MPa,增加的 5.7 MPa 是液性转换在沿程摩阻上的消耗,分析未取得预期暂堵效果;继续施工中,在入井液液量为 1 382 m^3 时实施第 2 次滑溜水粉陶段塞暂堵工艺,阶段泵入滑溜水 40 m^3 ,施工压力由 70.3 MPa 上升至 74.5 MPa,起到一定效果,后期 3 个段塞施工压力逐步抬升,暂堵起到了较好效果。



注:柱状图为该压裂段对应地质参数曲线,下方曲线图为该段的压裂施工曲线
微地震事件点三维图显示的为压裂施工曲线中黑色线段对应时刻的微地震累计事件点

图 10 焦页 BB-2HF 井第 10 段微地震事件俯视、侧视图

Fig.10 Top view, side view of the micro-seismic event of the 10th stage of the well Jiaoye BB-2HF

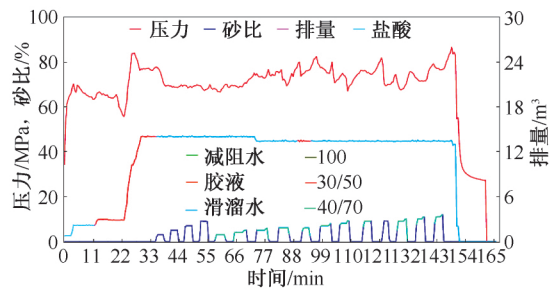


图 11 焦页 CC-4H 井 F 第 19 段压裂记录曲线
Fig.11 Fracturing record curve of the 19th stage of the well Jiaoye CC-4HF

3.5 实施效果评价

焦页 AA-BB 井组 4 口井分段压裂施工结束后,结合微地震监测新认识及压裂新启示,后期在 CC 井组未完成试气的 5 口井压裂施工中,推广应用了本文提出的分段压裂优化措施,单井单段设计砂液符合率及现场施工调整有效率得到大幅提高,焦页 AA、BB、CC 井组 9 口井归一化无阻流量-测试压力成果图如图 12 所示。

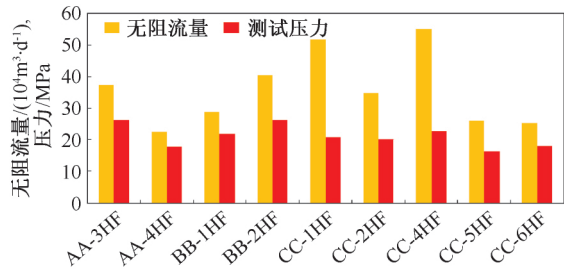


图 12 焦页 AA、BB、CC 井组 9 口井归一化
无阻流量、测试压力成果图
Fig.12 Normalized open flow capacity and test pressure
results of 9 wells in the well group Jiaoye AA, BB and CC

从图 12 可以看出,在同等测试压力条件下,

焦页 CC 井组的归一化 1 500 m 水平段无阻流量明显高于焦页 AA-BB 井组,其中焦页 CC-1HF 与焦页 CC-4HF 井的无阻流量甚至大于 $50\times10^4\text{ m}^3$,测试成果接近达到预期目标(涪陵双二十指标)。充分说明依据井中微地震监测技术提出的放大段间距、优化射孔位置、优化前置破裂提排量方式以及优化中后期暂堵转向工艺等技术来提高焦石坝页岩储层裂缝复杂程度和产量具有可行性和推广性。

4 结论

(1)压裂期间井中微地震实时监测对涪陵页岩气田单井压后水力缝网形态,裂缝几何尺度及 SRV 提供了一套参考性强的工程数据,对后期压后评估及优化压裂方案起到了较好的借鉴作用。

(2)页岩气分段压裂人工裂缝延展规模及方向受地质因素影响较大,充分利用地震、地质及测井等数据,优化段间距、优选射孔位置,实现段间均匀有效改造,以期降低试气成本,提高单井效益。

(3)在天然裂缝相对不发育的焦石坝主体构造带,研究表明,不同储层前置预处理的好坏直接影响单段压裂效果,实际施工可将 $800\sim1\,600\text{ m}^3$ 泵注阶段作为中途主动性进攻措施的最佳时机。

(4)焦页 CC 井组压裂施工应用井中微地震监测对压裂的几点启示,不断调整优化压裂工艺措施,试气效果达到预期目标,下步建议在相似区域、相近地质条件的页岩气井工厂压裂试气中加大推广应用力度。

致谢:感谢中石化重庆涪陵页岩气勘探开发有限公司以及西

南石油大学提供的帮助,同时感谢国家科技重大专项“涪陵页岩气开发示范工程”的资助。

参考文献

- [1] 刘尧文,廖如刚,张远,等.涪陵页岩气田井地联合微地震监测气藏实例及认识[J].天然气工业,2016,36(10):56-62.
LIU Yaowen, LIAO Rugang, ZHANG Yuan, et al. Examples and knowledge of gas reservoir monitoring in Ful-ing shale gas field [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(10):56-62.
- [2] 王志刚.涪陵焦石坝地区页岩气水平井压裂改造实践与认识[J].石油与天然气地质,2014,35(3):425-430.
WANG Zhigang. Practice and understanding of horizontal well fracturing improvement in Jiaoshiba area, Fuling [J]. Petroleum and Natural Gas Geology, 2014, 35(3):425-430.
- [3] 郭小哲,周长沙.页岩气藏压裂水平井渗流数值模型的建立[J].西南石油大学学报(自然科学版),2014,36(5):90-96.
GUO Xiaozhe, ZHOU Changsha. Numerical modeling of seepage flow in fractured horizontal wells in shale gas reservoirs [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2014, 36(5):90-96.
- [4] 刘玉章,修乃岭,丁云宏,等.页岩储层水力裂缝网络多因素耦合分析[J].天然气工业,2015,35(1):61-66.
LIU Yuzhang, XIU Nailing, DING Yunhong, et al. Multi factor coupling analysis of hydraulic fracture network in shale reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(1):61-66.
- [5] 赵金洲,李勇明,王松,等.天然裂缝影响下的复杂压裂裂缝网络模拟[J].天然气工业,2014,34(1):68-73.
ZHAO Jinzhou, LI Yongming, WANG Song, et al. Network simulation of complex fracture under natural fractures [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(1):68-73.
- [6] 崔杰,焦永树,曹维勇,等.各向异性地层中井孔周围应力场的研究[J].工程力学,2011,28(7):31-36.
CUI Jie, JIAO Yongshu, CAO Weiyong, et al. Study on stress field around boreholes in anisotropic formations [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(7):31-36.
- [7] 刘博,梁雪莉,容娇君,等.非常规油气层压裂微地震监测技术及应用[J].石油地质与工程,2016,30(1):142-145.
LIU Bo, LIANG Xueli, RONG Jiaojun, et al. Technology and application of micro seismic monitoring for fracturing in unconventional oil and gas reservoirs [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2016, 30(1):142-145.
- [8] 崔荣旺.微地震压裂监测应在井中进行[J].大庆石油地质与开发,2007,26(4):138-142.
CUI Rongwang. Microseismic fracturing monitoring should be carried out in the well [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(4):138-142.
- [9] 吕世超,郭晓中,贾立坤.水力压裂井中微地震监测资料处理与解释[J].油气藏评价与开发,2013,3(6):37-42.
LYU Shichao, GUO Xiaozhong, JIA Likun. Processing and interpretation of microseismic monitoring data in hydraulic fracturing wells [J]. Evaluation and Development of Oil and Gas Reservoirs, 2013, 3(6):37-42.
- [10] 胡庆春,孟米.基于大井距油气田的微地震压裂监测技术研究[J].天然气技术与经济,2011,5(4):18-20.
HU Qingchun, MENG Mi. Research on micro seismic fracturing monitoring technology based on large well distance oil and gas fields [J]. Natural Gas Technology and Economy, 2011, 5(4):18-20.
- [11] 张大椿,刘晓.微地震监测技术及其在油田中的应用[J].新疆石油科技,2013,23(3):12-15.
ZHANG Dachun, LIU Xiao. Microseismic monitoring technology and its application in oil field [J]. Xinjiang Petroleum Science & Technology, 2013, 23(3):12-15.
- [12] SCORT M P, JOHNSON R L, DATE Y A, et al. Evaluating hydraulic fracture geometry from sonic anisotropy and radioactive tracer logs [C]. SPE 133059, 2010.
- [13] VINAL I, DAVIS T. Surface time-lapse multi-component seismology-a new technology for hydraulic fracture monitoring? A montney shale gas case study [J]. First Break, 2015, 33(5):65-70.
- [14] REFUNJOL X E, MARFURT K J, LE CALVEZ J H, et al. Inversion and attribute-assisted hydraulically induced microseismic fracture characterization in the North Texas Barnett Shale [J]. Leading Edge, 2011, 30(3):292-299.
- [15] 肖立锋.天然场面波在隧道勘察中的应用[J].铁道勘察,2017,43(5):41-44.
XIAO Lifeng. Application of natural source surface wave in tunnel exploration [J]. Railway Investigation and Surveying, 2017, 43(5):41-44.
- [16] 陈承申.天然源面波法及地震映像法在采空区勘察中的综合应用[J].铁道勘察,2017,43(5):32-35.
CHEN Chengshen. The synthetic application of natural source surface wave method and seismic imaging method in the exploration of goaf [J]. Railway Investigation and Surveying, 2017, 43(5):32-35.
- [17] SHERILYN W S. Blueprint aids microseismic frac monitoring in the Marcellus shale [J]. E; P; A Hart Energy Publication, 2012, 85(9):58-60, 62.
- [18] WARPINSKI N R, DU J, ZIMMER U. Measurements of hydraulic-fracture-induced seismicity in gas shale [J]. SPE Production & Operations, 2012, 27(3):240-252.
- [19] 钟尉,朱思宇.地面微地震监测技术在川南页岩气井压裂中的应用[J].油气藏评价与开发,2014,4(6):71-74.

- ZHONG Wei, ZHU Siyu. Application of surface micro-seismic monitoring technology in shale gas well fracturing in South Sichuan [J]. Evaluation and Development of Oil and Gas Reservoirs, 2014, 4 (6): 71-74.
- [20] 李雪, 赵志红, 荣军委. 水力压裂裂缝微地震监测测试技术与应用[J]. 油气井测试, 2012, 21(3): 43-45.
- LI Xue, ZHAO Zhihong, RONG Junwei. Micro seismic monitoring technology and application of hydraulic fracturing [J]. Well Testing, 2012, 21(3): 43-45.
- [21] 杨炳祥, 邹一锋. 水平井分段压裂井下微地震裂缝监测技术应用[J]. 油气井测试, 2015, 24(3): 59-61.
- YANG Bingxiang, ZOU Yifeng. Application of downhole micro seismic monitoring technology in horizontal well fracturing [J]. Well Testing, 2015, 24(3): 59-61.
- [22] 李大军, 杨晓, 王小兰, 等. 四川盆地W地区龙马溪组页岩气压裂效果评估和产能预测研究[J]. 石油物探, 2017, 56(5): 735-745.
- LI Dajun, YANG Xiao, WANG Xiaolan, et al. Evaluation and productivity prediction of shale gas cracking in the long Maxi formation in W area, Sichuan basin [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56 (5): 735-745.
- [23] 杨瑞召, 李德伟, 庞海玲, 等. 页岩气压裂微地震监测中的裂缝成像方法[J]. 天然气工业, 2017, 37 (5): 31-37.
- YANG Ruizhao, LI Dewei, PANG Hailing, et al. Fracture imaging method for shale gas fracturing in micro seismic monitoring [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37 (5): 31-37.
- [24] 马庆利. 页岩气压裂复杂缝网形成条件及方法[J]. 石化技术, 2017, 24(3): 104-105.
- MA Qingli. Formation conditions and methods of complex seams for shale gas pressure crack [J]. Petrochemical Technology, 2017, 24(3): 104-105.
- [25] 陈新安. 页岩气水平井分段压裂微地震监测认识及应用[J]. 特种油气藏, 2017, 24(1): 170-174.
- CHEN Xinan. Understanding and application of micro seismic monitoring for staged fracturing of shale gas horizontal wells [J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2017, 24(1): 170-174.
- [26] 巫芙蓉, 闫媛媛, 尹陈. 页岩气微地震压裂实时监测技术——以四川盆地蜀南地区为例[J]. 天然气工业, 2016, 36(11): 46-50.
- WU Furong, YAN Yuanyuan, YIN Chen. Real time monitoring technology of shale gas microseismic fracturing-Taking the southern Shu area of Sichuan basin as an example [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36 (11): 46-50.
- [27] 刘旭礼. 井下微地震监测技术在页岩气“井工厂”压裂中的应用[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(4): 102-107.
- LIU Xuli. Application of downhole microseismic monitoring technology in shale gas well factory fracturing [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(4): 102-107.
- [28] 赵超峰, 张伟, 田建涛, 等. 微地震事件解释实例[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(4): 770-777.
- ZHAO Chaofeng, ZHANG Wei, TIAN Jiantao, et al. Interpretation examples of microseismic events [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(4): 770-777.
- [29] 赵争光, 秦月霜, 杨瑞召. 地面微地震监测致密砂岩储层水力裂缝[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2136-2139.
- ZHAO Zhengguang, QIN Yueshuang, YANG Ruizhao. Hydraulic fracture mapping for a tight sands reservoir by surface based microseismic monitoring [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2136-2139.

编辑 刘振庆

第一作者简介:高东伟,男,1986年出生,助理研究员,2008年毕业于重庆科技学院油气田应用化工专业,现从事页岩气勘探开发研究。电话:18627088650;Email:gaodongwei@qq.com。通信地址:重庆市涪陵区中石化重庆涪陵页岩气勘探开发有限公司,邮政编码:408014。