

引用:李颖涛,杨国旗,冯洋,等.基于井中微地震监测方法的压裂效果评价——以延安探区 YP5-1 井为例.非常规油气,2022,9(6):114-120.

Cite:LI Y T, YANG G Q, FENG Y, et al. Fracturing effect evaluation based on borehole microseismic monitoring method: Take well YP5-1 in Yan'an exploration area as an example. Unconventional Oil & Gas, 2022, 9(6): 114-120.

基于井中微地震监测方法的压裂效果评价 ——以延安探区 YP5-1 井为例

李颖涛,杨国旗,冯洋,李富豪,韩伟,杨强强,
刘婵,郑艳,文明,刘磊,魏强

(陕西延长石油集团油气勘探公司采气一厂,陕西延安 716005)

摘要:为了能够实时精确监测页岩气水平井水力压裂裂缝空间形态及储层改造体积,针对压裂过程中无法定量描述人工裂缝扩展形态,无法研究压裂裂缝扩展影响因素的问题,运用井中微地震监测技术,对宝塔南 YP5-1 井第 1~第 13 压裂段压裂全过程进行了裂缝监测,结果表明:1)对比分析微地震事件纵横波差异,表明受储层天然裂缝发育影响,压裂裂缝出现不对称发育现象;2)人工裂缝 FCL 为 0.32~0.71,裂缝复杂程度较高,SRV 重合性较低,单层压裂裂缝重复交叉较少,表明储层改造效果比较好;3)微地震监测成果与测井显示结果密切相关,物性条件较好的压裂层段微地震事件比较多,裂缝复杂程度较高,储层改造效果更好。以上成果对分析微地震事件空间展布,研究储层物性,客观准确评价储层改造效果等具有一定指导与借鉴作用。

关键词:宝塔南页岩气;微地震监测;压裂评价;不对称性;储层特征;压裂参数

中图分类号:TE357

文献标识码:A

DOI:10.19901/j.fcgyq.2022.06.17

Fracturing effect evaluation based on borehole microseismic monitoring method ——Take well YP5-1 in Yan'an exploration area as an example

LI Yingtao, YANG Guoqi, FENG Yang, LI Fuhao, HAN Wei, YANG Qiangqiang,
LIU Chan, ZHENG Yan, WEN Ming, LIU Lei, WEI Qiang

(No. 1 Gas Production Plant of Oil and Gas Exploration Company of Shaanxi Yanchang
Petroleum Group, Shaanxi Yan'an 716005, China)

Abstract: In order to simultaneously and accurately describe the spatial distribution state of fractures formed by hydraulic fracturing in shale gas horizontal wells, aiming at the problem that it is impossible to quantitatively describe the artificial fracture propagation form and study the influencing factors of fracture propagation in the fracturing

收稿日期:2021-12-21 修改日期:2022-01-03

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“延安地区陆相页岩气勘探开发关键技术”(2017ZX05039)

第一作者简介:李颖涛(1991—),男,硕士,工程师,主要从事非常规油气地质及勘探评价等方面的研究工作。E-mail:lyt7551@163.com

process, the in well microseismic monitoring technology was used to monitor the whole fracturing process of fracturing sections 1~13 of well YP5-1 in south Baota. The results show that: 1) The comparative analysis of P-wave and S-wave differences of microseismic events shows that the fracturing fractures appear asymmetric development due to the development of natural fractures in the reservoir; 2) The FCL of artificial fractures is 0.32~0.71, the fracture complexity is high, the SRV coincidence is relatively low, and the repeated intersection of single-layer fracturing fractures is less, indicating that the effect of reservoir reconstruction is relatively good; 3) The results of log interpretation and microseismic monitoring are correlated, and the fractured reservoir with better physical properties has more microseismic events, higher fracture complexity, better reservoir reconstruction effect. The research results can be used to explain the spatial distribution characteristics of microseismic events, research reservoir properties, and evaluate the fracturing effect objectively and accurately.

Keywords: shale gas of the south Baota; microseismic monitoring; fracturing evaluation; asymmetry; reservoir characteristics; fracturing parameters

0 引言

近年来出现了多种评价页岩致密气藏储层改造的新技术,其中微地震裂缝监测是储层改造评价现场应用效果较好的一项技术。该技术通过邻井井下检波器实时接收压裂过程中岩石破裂释放的地震波,精确反演定位微地震事件,筛选有效事件描述压裂过程中人工裂缝扩展的长度、宽度、高度以及方位角等参数,现场根据实时的裂缝数据采取优化压裂施工参数、合理部署井网等油气田开发措施提高油气田整体采收率^[1-5]。作为实时评价储层改造效果重要方法之一,微地震监测技术越来越多的应用到非常规油气藏储层改造中^[6-8]。巫芙蓉^[9]等通过微地震监测压裂施工过程中人工裂缝扩展情况,及时合理调整压裂施工参数,从而提升储层整体改造效果;陈新安^[10]通过微地震监测技术,深入研究条带曲率裂缝发育区页岩气井压裂过程中人工裂缝扩展规律,进而提高该区域页岩储层改造效率;毕曼等^[11]根据常规压裂与混合压裂的微地震监测结果,评价了2种技术的适用性,为后期储层改造方法的选择提供指导;赵超峰等^[12]与赵争光等^[13-14]深入研究三维地震资料与微地震监测成果的相关性,分析微地震事件的分布规律,总结压裂裂缝扩展的影响因素。

陕西延长石油集团油气勘探公司在鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东南区块进行多年页岩气勘探开发,针对页岩气水平井压裂过程中无法定量描述人工裂缝扩展形态,无法研究压裂裂缝扩展影响因素,进而无法探索人工裂缝扩展规律等,通过压裂储层岩石破裂释放能量来反演定位微地震事件,根据有效事件定量描述人工裂缝空间展布和储层改造体

积^[15-17],基于储层物性、测井数据以及三维地震数据,结合现场压裂施工参数,研究影响人工裂缝扩展的主要因素,探索压裂过程中裂缝扩展规律,更好的提高储层改造效果。

该研究在压裂施工过程中,高压泵入储层大量高黏度流体,储层孔隙压力迅速升高,储层岩石受高孔隙压力发生切破裂和张性破裂释放地震波,邻井井中的检波器实时接收地震波,准确反演定位微地震事件,剔除与压裂增产无关事件,利用有效微地震事件确定压裂裂缝的缝型、形态、方位以及体积等参数,进而评价压裂改造效果。

1 地震监测概况

YP5-1井页岩气水平井位于延安气田宝塔区块,储层厚度为15.93~19.09 m,岩性主要是泥页岩和泥质砂岩,属于典型的非常规气藏。根据岩心测试结果,储层孔隙度为2.62%~2.88%,渗透率为1.4~2.5 mD,属于低孔低渗性气藏。

YP5-1井运用超临界CO₂前置增能水平井体积压裂工艺技术,采用滑溜水、线性胶一体化压裂液体系,高返排,低伤害;为满足地层闭合压力需求,针对不同压裂层段,选用20~40目、40~70目和70~100目陶粒作为支撑剂。该井水平段长度为1 023.67 m,完钻井深为3 628.67 m,目标层位钻遇率86.5%,共压裂13个压裂段,施工排量为12~14 m³/min,加砂总量为649.5 m³,压裂液总量为12 995 m³。现场选取邻井Y150井作为监测井,对YP5-1井进行微地震裂缝监测,评价其压裂改造效果。图1所示为YP5-1井和Y150井相对位置图,在Y150井中放置12级Maxiwave三分量检波器进行接收,检波器级间距定为20 m,放置位置为

2 110~2 330 m,检波器和 YP5-1 井射孔点位置的
距离为 220~1 350 m。

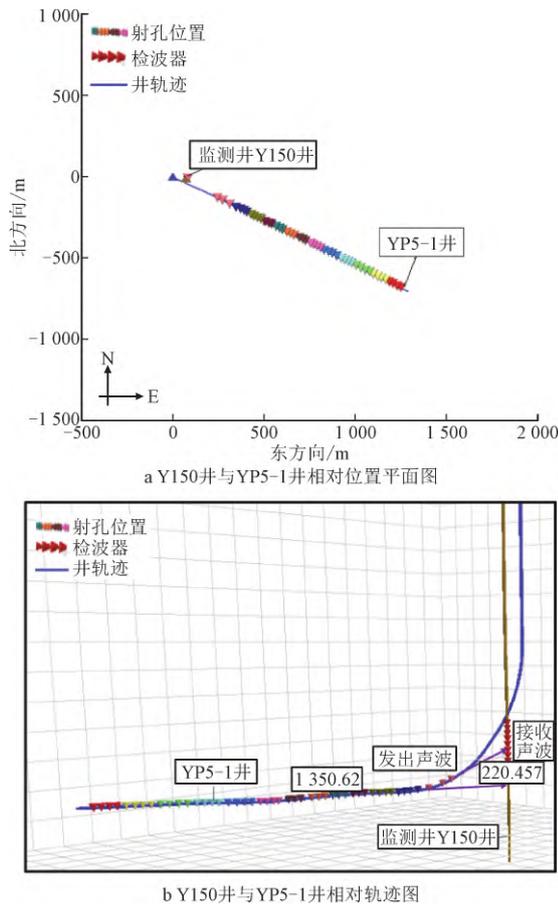


图 1 Y150 井与 YP5-1 井相对位置图
Fig.1 Relative position of well Y150 and
well YP5-1

2 微地震解释与压裂效果评价

2.1 监测结果

延安气田宝塔区块 YP5-1 井共实时监测 13 个井段,有效微地震事件总计 2 081 个,定位误差为 0.2~10.5 m,震级为-3.65~-2.50,微地震监测结果如图 2 所示。第 1~第 3 段因设备原因,测得的微地震事件较少,仅反映部分裂缝形态(如图 2a 中紫色椭圆所示),文中不做详细分析;第 4~第 6 段微地震事件正常,沿射孔簇向井眼轨迹两侧对称扩展,与主裂缝方向保持一致(如图 2a 中蓝色椭圆所示);第 7~第 9 段开始出现部分离散型微地震事件,在远离该压裂段的井轨迹西侧集中出现,但主体

微地震事件仍保持向井眼轨迹两侧扩展(如图 2a 中红色椭圆所示);第 10~第 13 段同样出现裂缝在西翼扩展比较多,东翼裂缝扩展较少的现象(如图 2a 中黑色椭圆所示)。分析其产生原因,由于西翼为地层微裂缝发育区域,属于应力异常区域,压裂过程中高压液体压入地层,高压传递到应力异常区域,造成该区应力失衡,岩石破碎释放能量,造成西翼微地震事件多于东部。

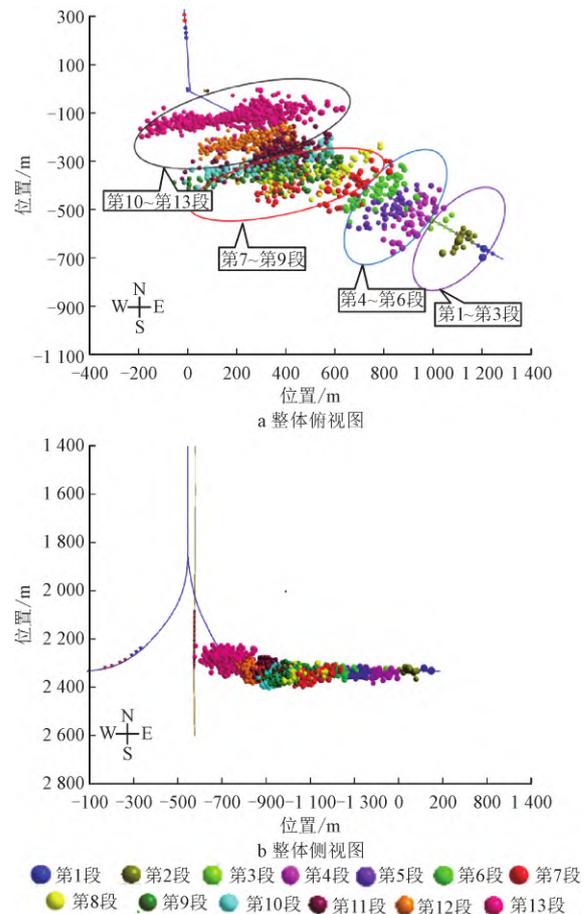


图 2 微地震监测结果
Fig.2 Microseismic monitoring results

通过反演定位有效微地震事件空间分布,计算出单层压裂裂缝空间形态参数以及方位(见表 1)。平均裂缝网络总长为 380.8 m,宽为 102.3 m,高为 69.3 m,从第 7 段开始受西翼地层微裂缝发育影响,西翼裂缝扩展范围大于东翼,出现不对称扩展现象;根据各压裂裂缝走势可知,压裂层段主裂缝发育方向基本一致,为北偏东 50°~81°。

表 1 各段人工裂缝网络参数

Table 1 Parameters of artificial fracture network in each section

压裂段	裂缝网络长/m		裂缝网络总长/m	裂缝网络宽/m	裂缝网络高/m	裂缝网络走向
	西翼	东翼				
4	168	157	325	88	55	北偏东 50°
5	168	155	323	85	52	北偏东 58°
6	155	150	305	78	45	北偏东 53°
7	187	163	350	123	73	北偏东 51°
8	201	166	367	112	68	北偏东 51°
9	281	85	366	130	83	北偏东 59°
10	255	75	330	70	56	北偏东 73°
11	243	102	345	107	66	北偏东 70°
12	298	94	392	118	70	北偏东 71°
13	426	379	705	112	125	北偏东 81°
平均			380.8	102.3	69.3	N/A

2.2 压裂效果评价

2.2.1 压裂缝长不对称性分析

YP5-1 井前 7 段压裂段裂缝东西两翼扩展相对比较对称;第 7 段裂缝先在本压裂段扩展,压裂后期裂缝沟通异常区,出现不对称发育;第 8~第 13 段裂缝从一开始就出现不对称发育,大量微地震事件向井筒西翼扩展,东翼裂缝发育受限制,异常微地震事件纵横波时差明显比正常压裂段位置信号小(如图 3 和图 4 所示),后 6 段压裂段信号呈现同样特征;说明西翼地层有较多微裂缝发育,当高压流体进入该区域,更倾向于进入微裂缝发育区域,岩石更易发生破裂,能量以波的形式传播而被邻井检波器所接收,导致异常区域的纵横波时差较小,微地震事件数量比较多,如图 5 所示。

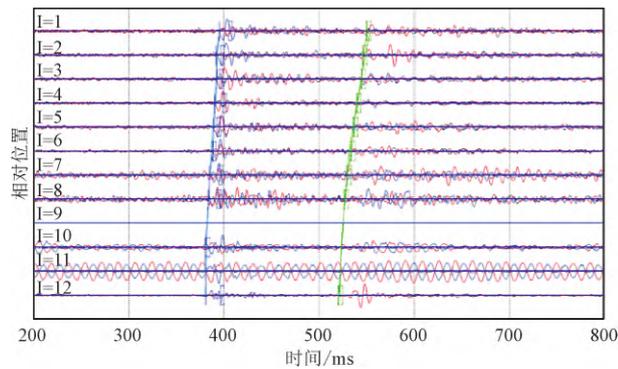


图 3 正常纵横波时差曲线图(时差明显较大)

Fig. 3 Normal P-wave TDOA curve (The time difference is obviously large)

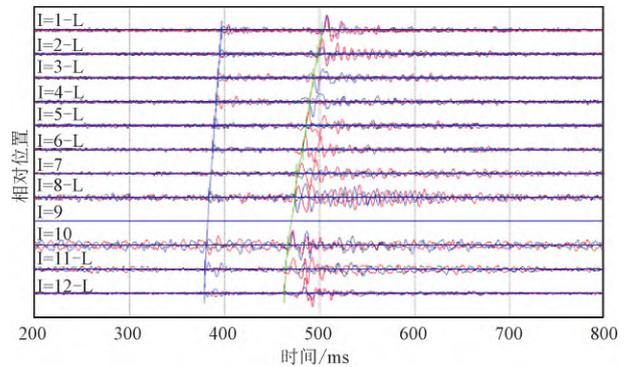


图 4 异常位置纵横波时差曲线图(时差明显较小)

Fig. 4 P-wave TDOA curve at abnormal position (The time difference is obviously small)

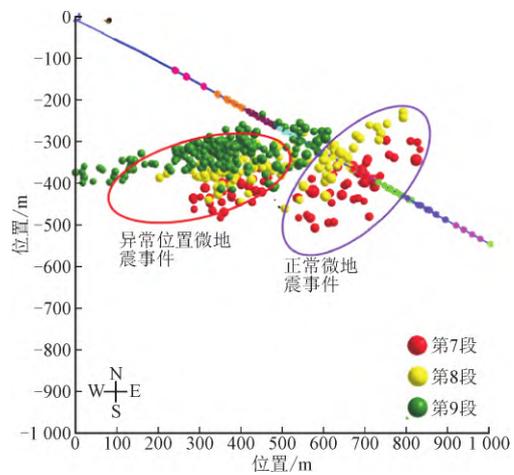


图 5 第 7~第 9 段监测结果平面图

Fig. 5 Plane graphics of monitoring results of section 7~section 9 fracturing section

2.2.2 压裂裂缝复杂程度分析

裂缝复杂指数(FCL)用于定量描述压裂裂缝的复杂程度,能够直观评价储层改造效果,其数值为压裂裂缝的宽度与长度之比。FCL 越大代表压裂的人工裂缝复杂程度越高,其储层压裂改造效果就越好^[18-19]。根据单层压裂裂缝几何形态参数计算出第4~第13段压裂裂缝 FCL(见表2)。监测的10段人工裂缝的 FCL 为 0.32~0.71,充分表明压裂形成的人工裂缝复杂程度比较高,裂缝宽度拓展性较好,整体储层改造效果比较好。

表2 人工裂缝复杂指数表

Table 2 Fracture complexity index of micro-fracture

压裂段	裂缝网络长/m		裂缝半长/m	裂缝网络宽/m	FCL
	西翼	东翼			
4	168	157	162.5	88	0.54
5	168	155	161.5	85	0.53
6	155	150	152.5	78	0.51
7	187	163	175.0	123	0.7
8	201	166	183.5	112	0.61
9	281	85	183.0	130	0.71
10	255	75	165.0	70	0.42
11	243	102	172.5	107	0.62
12	298	94	196.0	118	0.60
13	426	379	352.5	112	0.32

2.2.3 储层改造体积分析

储层改造体积(SRV)是先将非随机性微地震事件空间分布范围进行网格化,再根据微地震事件密度分布计算裂缝网格化的体积,进而得到单层压裂段人工裂缝体积(见表3),该数值能直观反映出

表3 单层压裂裂缝储层改造体积

Table 3 SRV of fractures by single-stage fracturing

压裂段	裂缝网络	裂缝网络	裂缝网络	SRV /($\times 10^4 \text{ m}^3$)
	总长/m	宽/m	高/m	
4	325	88	55	308
5	323	85	52	306
6	305	78	45	298
7	350	123	73	576
8	367	112	68	556
9	366	130	83	589
10	330	70	56	320
11	345	107	66	525
12	392	118	70	579
13	705	112	125	784
平均	380.8	102.3	69.3	484.1

储层改造体积及效果。由监测结果可知,单层压裂段体积相加之和为 $4\ 841 \times 10^4 \text{ m}^3$,整体10段压裂的储层改造体积为 $4\ 587 \times 10^4 \text{ m}^3$,SRV重合比为5.54%,表示单层压裂裂缝重复交叉较少,储层改造效果比较理想,如图6所示。

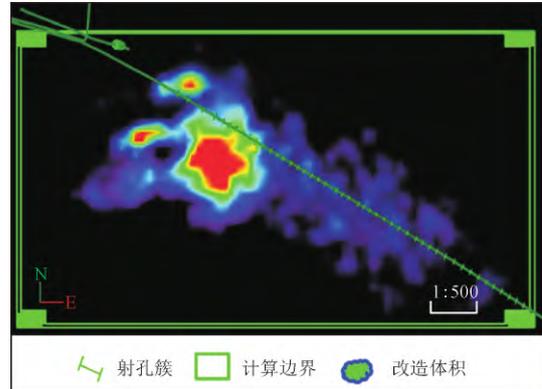
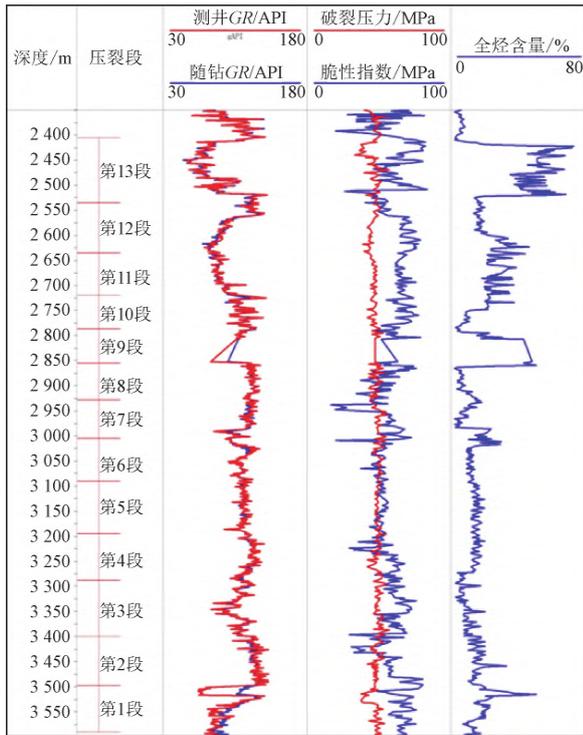


图6 计算储层改造体积

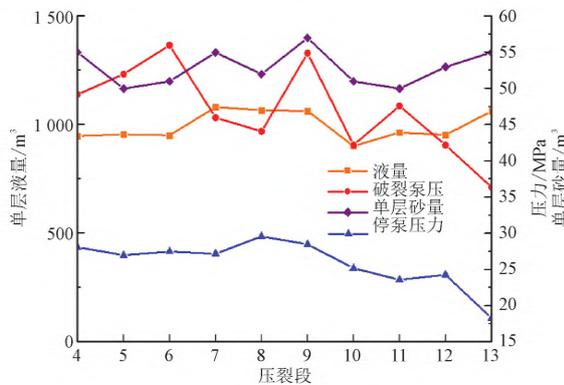
Fig.6 Calculation of SRV

2.2.4 测井解释成果与微地震监测成果联合解释

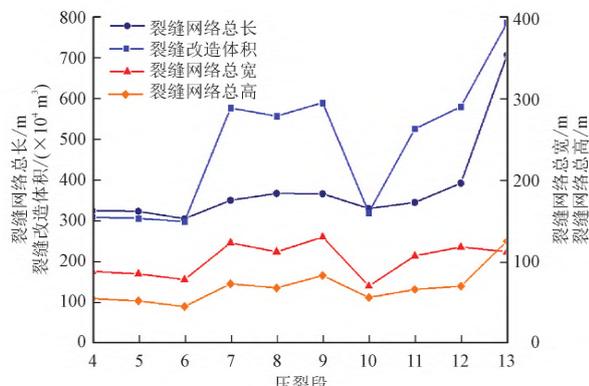
根据 YP5-1 井裂缝监测俯视图,定性分析各压裂段裂缝复杂程度,第7~第13段裂缝改造效果比较好;将微地震监测结果与压裂施工参数及地层测井解释曲线进行对比分析,研究三者之间的相关性。从图7a可以看出,第11~第13段GR相对较低,脆性指数比较大,储层脆性比较强,全烃含量比较高,含气量相对较大,储层物性条件比较好,微地震监测结果显示其微地震事件数量比较多,压裂裂缝复杂程度更高,储层改造体积相对比较大,说明微地震监测结果和测井解释成果具有相关性,即测井解释显示好的压裂段对应的微地震事件数量比较多,储层压裂改造效果比较好。第4~第10压裂段储层性质相当,第7、第8和第9压裂段比第4、第5、第6及第10压裂段施工液量大,产生的微地震事件相对较多,对应的压裂改造体积比较大,改造效果与储层物性好的第11、第12压裂段改造效果相当;另外,第13压裂段不仅储层性质好,其压裂施工液量和加砂量比较大,故改造效果非常好,单层改造体积达到 $784 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。对比分析结果表明:针对研究区域,对于物性条件比较差的储层,增加施工液量,有效增加人工裂缝的复杂程度,可提高压裂储层改造效果。



a 测井解释成果



b 压裂施工参数



c 裂缝参数

图 7 YP5-1 井微地震监测结果、压裂施工参数及测井解释成果对比图

Fig. 7 Comparison of microseismic monitoring results, fracturing construction parameters and logging interpretation results in well YP5-1

3 结论

1)综合延安气田探区测井解释成果以及井中微地震监测结果,可以精确反演定位有效微地震事件,定量分析压裂裂缝扩展参数,能够客观、准确地评价储层改造效果,为微地震监测技术广泛应用于评价非常规油气藏改造效果提供借鉴与指导。

2)YP5-1 水平井体积压裂微地震监测结果表明 13 段压裂段主裂缝方向为北偏东 $50^{\circ} \sim 81^{\circ}$,从第 7 压裂段开始受到西翼地层微裂缝发育影响,出现应力异常区域,有明显向西翼单向发育趋势,储层改造体积为 $4\ 587 \times 10^4\ \text{m}^3$,单层压裂重复交叉较少,裂缝复杂程度高,地层改造效果比较理想。

3)通过分析微地震监测与储层物性和压裂施工参数的相关性可知,对于物性条件较差的储层,可通过合理调整压裂液量等施工参数,来提高储层的改造效率,增加裂缝复杂程度,进而提高整体储层改造效果。

参考文献:

[1] 王维波,周瑶琪,春兰.地面微地震监测 SET 震源定位特性研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(5):45-50.
WANG W B,ZHOU Y Q,CHUN L.Characteristics of source localization by seismic emission tomography for surface based on microseismic monitoring[J].Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2012,56(5):45-50.

[2] 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 D J,YANG X,WANG X L,et al.Estimating the fracturing effect and production capacity of the Longmaxi Formation of the Lower Silurian in area W,Sichuan Basin[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2017,56(5):735-745.

[3] 刁瑞,吴国忱,崔庆辉,等.地面阵列式微地震监测关键技术研究[J].岩性油气藏,2017,29(1):104-109.
DIAO R,WU G C,CUI Q H,et al.Key techniques for surface array microseismic monitoring[J].Lithologic Reservoirs,2017,29(1):104-109.

[4] 李宏,杨心超,朱海波,等.水力压裂微地震震源定位与震源机制联合反演研究[J].石油物探,2018,57(2):312-320.
LI H,YANG X C,ZHU H B,et al.Joint inversion of source location and microseismic focal mechanism[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2018,57(2):312-320.

[5] 赵炜,辛维,毛中华,等.利用单井微地震波形能量反演震源机制[J].石油地球物理勘探,2018,53(5):945-953.
ZHAO W,XIN W,MAO Z H,et al.Focal mechanism inversion with single-well microseismic wave energy[J].Oil Grophysical Prospecting,2018,53(5):945-953.

[6] 翟文宝, 李军, 周英操, 等. 基于测井资料的页岩储层可压裂性评价新方法[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(3): 112 - 123.
ZHAI W B, LI J, ZHOU Y C, et al. New evaluation method of shale reservoir fracability based on logging data[J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(3): 112 - 123.

[7] 张洪, 孟选刚, 邵长金, 等. 水平压裂裂缝形成机理及监测——以七里村油田为例[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(5): 138 - 145.
ZHANG H, MENG X G, SHAO C J, et al. Forming mechanism and monitoring of horizontal hydraulic fracture: A case from Qilicun Oilfield[J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(5): 138 - 145.

[8] 李政, 常旭, 姚振兴, 等. 微地震方法的裂缝监测与储层评价[J]. 地球物理学报, 2019, 62(2): 707 - 719.
LI Z, CHANG X, YAO Z X, et al. Fracture monitoring and reservoir evaluation by micro-seismic method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(2): 707 - 719.

[9] 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 F R, YAN Y Y, YIN C. Real-time microseismic monitoring technology for hydraulic fracturing in shale gas reservoirs: A case study from the Southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(11): 46 - 50.

[10] 陈新安. 条带曲率裂缝发育区页岩气井裂缝扩展规律——以涪陵页岩气田焦石坝西南区块为例[J]. 断块油气田, 2018, 25(6): 58 - 62.
CHEN X A. Fracture propagation law for shale gas well instripecurvature-crack development area: A case study of southwest Jiaoshiba Block in Fuling shale gas field[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(6): 58 - 62.

[11] 毕曼, 杨映洲, 马占国, 等. 混合压裂在苏里格致密气藏水平井的应用[J]. 断块油气田, 2014, 21(5): 644 - 647.
BI M, YANG Y Z, MA Z G, et al. Application of hybrid fracturing in horizontal well of tight gas reservoir in Sulige Gasfield[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2014, 21(5): 644 - 647.

[12] 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 C F, ZHANG W, TIAN J T, et al. Interpretation examples of microseismic events[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(4): 770 - 777.

[13] 赵争光, 杨瑞召, 孙志朋, 等. 储层岩性对水力裂缝延伸的影响[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(2): 885 - 888.
ZHAO Z G, YANG R Z, SUN Z P, et al. Influence of reservoir lithology on hydraulic fracture propagation[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(2): 885 - 888.

[14] 杨瑞召, 赵争光, 彭维军, 等. 三维地震属性及微地震数据在致密砂岩气藏开发中的综合应用(英文)[J]. Applied Geophysics, 2013, 10(2): 37 - 49.
YANAG R Z, ZHAO Z G, PENG W J, et al. Integrated application of 3D seismic and microseismic data in the development of tight gas reservoirs[J]. Applied Geophysics, 2013, 10(2): 37 - 49.

[15] 马新仿, 李宁, 尹丛彬, 等. 页岩水力裂缝扩展形态与声发射解释——以四川盆地志留系龙马溪组页岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 974 - 981.
MA X F, LI N, YIN C B, et al. Hydraulic fracture propagation geometry and acoustic emission interpretation: A case study of Silurian Longmaxi Formation shale in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(6): 974 - 981.

[16] MAXWELL S C, NORTON M. Enhancing shale gas reservoir characterization using hydraulic fracture microseismic data[J]. First Break, 2012, 30(2): 95 - 101.

[17] REFUNJOL X E, MARFURTK K J, CALVEZ J L. Inversion and attribute-assisted hydraulically induced microseismic fracture characterization in the North Texas Barnett Shale[J]. The Leading Edge, 2011, 30(3): 292 - 299.

[18] 杨瑞召, 赵争光, 王占刚, 等. 页岩气开发微地震技术[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2017.
YANG R Z, ZHAO Z G, WANG Z G, et al. Microseismic Technology for Shale Gas Development[M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2017.

[19] 毛庆辉, 王彦春, 王鹏, 等. 改进的微震事件反演重定位方法及其应用[J]. 石油物探, 2015, 54(3): 359 - 366.
MAO Q H, WANG Y C, WANG P, et al. The improved microseismic event relocation method and its application[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54(3): 359 - 366.



(上接第 113 页)

[18] 李增亮, 杜明超, 董祥伟, 等. 单个角型颗粒冲蚀机理实验系统设计及实验[J]. 振动与冲击, 2018, 37(21): 195 - 203, 226.
LI Z L, DU M C, DONG X W, et al. Design and tests for single angular particle erosion mechanism test system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(21): 195 - 203, 226.

[19] 杜明超, 李增亮, 董祥伟, 等. 菱形颗粒冲击材料表面冲蚀磨损特性分析[J]. 摩擦学学报, 2020, 40(1): 1 - 11.
DU M C, LI Z L, DONG X W, et al. Analysis of material surface erosion characteristics due to rhomboid-shaped particle impact[J]. Tribology, 2020, 40(1): 1 - 11.

[20] 杜明超, 李增亮, 董祥伟, 等. 菱形颗粒冲蚀磨损特性试验及仿真研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(5): 501 - 511.
DU M C, LI Z L, DONG X W, et al. Experimental and numerical study on erosion characteristics of rhomboid particles[J]. Tribology, 2018, 38(5): 501 - 511.