

doi: 10.11720/wtyht.2017.1.26

王纳申,张译丹,黄家旋,等.用微地震技术评价姬塬油田体积压裂的效果[J].物探与化探,2017,41(1):165-170.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.1.26

Wang N S,Zhang Y D,Huang J X,et al.The application of micro-seismic monitoring and evaluation technology to evolution of volume fracturing effect in the Jiyuan oilfield[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2017,41(1):165-170.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.1.26

# 用微地震技术评价姬塬油田体积压裂的效果

王纳申<sup>1</sup>,张译丹<sup>2</sup>,黄家旋<sup>1</sup>,徐铠炯<sup>1</sup>

(1.西安石油大学 地球科学与工程学院,陕西 西安 710065; 2.中国地质大学(北京) 能源学院,北京 100083)

**摘要:**微地震监测技术是对低渗透储层压裂效果评价和指导油藏精细注水开发的重要手段。通过观测、分析由压裂产生的微小地震事件,能够获取压裂裂缝的位置、大小、导流能力、几何形态及局部裂缝分布规律等诸多信息。姬塬油田王盘山长 8 油藏具有低孔、低渗、低压特征,常规压裂生产一段时间后减产很快;近年来开展了混合水体积压裂并实施了微地震监测。芦 58-54 井监测混合水体积压裂结果显示:产生的缝长达到 315.97 m,缝宽 104 m,缝高约 58 m,影响体积约 244.8 万 m<sup>3</sup>,方位北偏东 19.5°;压裂使储层裂缝开启,泄油半径增大,单井产油量增加,效果非常明显。为该油藏进一步精细开发打下了坚实基础。

**关键词:**微地震监测技术;混合水体积压裂;姬塬油田;压裂缝几何特征

**中图分类号:** P631.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2017)01-0165-06

## 0 引言

微地震监测是以声发射学和地震学原理为基础,通过观测、分析生产活动中所产生的微小地震事件来监测生产活动之影响、效果及地下状态的地球物理技术。与地震勘探不同的是,微地震监测中震源的位置、发震时刻、震源强度都是未知的,而这些因素正是生产中想要了解的,微地震监测恰好能完成这个任务。

微地震监测主要包括数据采集、震源成像和精细反演等几个关键步骤,其应用有几个方面。利用微地震监测储层压裂产生的效果,特点是通过井中地震技术和反射地震技术相结合,增强了常规监测的功能,降低了储层监测的周期和费用。

微地震监测技术有了 50 余年的发展历史,1962 年,有人提出了利用微地震技术监测地质生产过程中的变化,以提高生产效率,保证可持续性生产。20 世纪 80 年代微地震技术被用于矿山工程、地热开发

等领域,20 世纪 90 年代末期微地震技术被引入到石油行业<sup>[1]</sup>。我国在 20 世纪初开始引进该项技术<sup>[2]</sup>,分别在大庆油田、华北油田、长庆油田等进行了尝试,经过百余口井的实际观测,表明结果可靠,方法可行,可以作为注水、调剖、井网布署与调整的依据,为油田解决了许多关键性问题。

2005 年,长庆油田首次在庄 19 井区用微地震技术监测了压裂效果<sup>[3]</sup>。延长集团也在吴起油田应用微地震技术监测了水驱前缘注水产生的裂缝发育状况、注水波及区域以及优势区域等。2013 年 7 月,在姬塬油田王盘山长 8 油藏芦 58-54 井区开展了混合体积压裂,压裂同时利用微地震技术监测了该次混合体积压裂产生的裂缝规模和主导方向,以及评价体积压裂的效果,为精细油藏开发提供条件。

## 1 研究区开展体积压裂的背景

姬塬油田王盘山长 8 油藏位于陕西省定边县王盘山乡与樊学乡境内,该油藏勘探始于 2006 年,

收稿日期:2016-03-16;修回日期:2016-11-21

基金项目:中国石油长庆油田“姬塬油田混合水体积压裂试验研究”课题

作者简介:王纳申(1992-),男,硕士研究生,毕业于西安石油大学资源勘查工程专业,获学士学位,现就读于西安石油大学地球科学与工程学院矿物学、岩石学、矿床学专业,主要从事油藏精细描述和储层评价等研究工作。Email:hongzao9209@163.com

2010 年采用 480m×150m 井排距菱形反九点井网进行规模开发(图 1)。长 8 油层组根据砂体连通性和隔层特点,进一步划分为长 8<sub>1</sub>、长 8<sub>2</sub><sup>1</sup>、长 8<sub>2</sub><sup>2</sup> 三个小层,主力开发层位为长 8<sub>2</sub><sup>1</sup> 层。长 8 油藏受岩性控制为主,埋深达 2 700~2 800 m,油层平均厚度 17.6 m,平均渗透率 0.76×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,平均孔隙度 11.22%,平

均孔径 42 μm,原始含油饱和度 54.8%,原始地层压力 18.3 MPa,原始气油比 67.5 m<sup>3</sup>/t,地层原油饱和压力 8.16 MPa。属低孔、低渗、低压油藏。2013 年前,该油藏油井开井数 131 口(图 1),日产油 178 t,单井产能 1.36 t/d,综合含水 38.2%,采油速度 1.30%,采出程度 1.73%;采油速度和采出程度均较低。

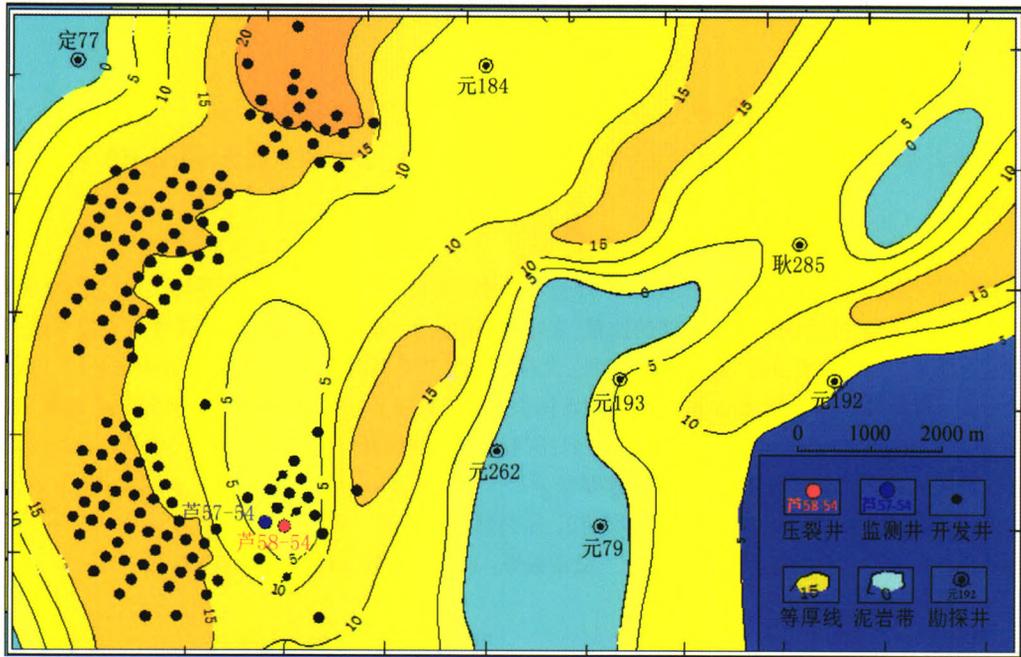


图 1 王盘山长 8 油藏主力油层长 8<sub>2</sub><sup>1</sup> 砂体厚度分布及芦 58-54 等井位分布

## 2 混合水体积压裂特点及增产效果分析

### 2.1 研究区储层常规压裂状况

结合王盘山长 8 油藏的油层厚度、储层应力、油层纵向连续性、隔夹层发育程度等特征,该油藏早期

储层改造主要采用常规加砂压裂(部分为多级加砂压裂)(表 1)。累计完试油井 124 口,平均单井试排日产油 7.9 m<sup>3</sup>,累计投产油井 123 口,满三个月产油井有 117 口,投产前三个月平均单井日产油 1.37 t,含水 52.3%,没有达到增产的预期效果。

表 1 2010~2012 年王盘山长 8 试油压裂数据统计

年份	井数 (口)	油层参数					压裂参数			试排结果				
		厚度 m	电阻 Ω·m	孔隙度 %	渗透率 mD	含油饱和 度/%	声波时差 μs/m	砂量 m <sup>3</sup>	砂比 %	排量 m <sup>3</sup> /min	抽深 m	动液面 m	日产油 m <sup>3</sup> /d	日产水 m <sup>3</sup> /d
2010	52	16.90	26.92	12.09	1.46	48.81	224.14	40.6	32.6	2.2	2080	1942	9.90	4.70
2011	22	16.10	22.64	10.74	0.97	48.74	223.63	42.7	30.1	2.2	1999	1881	7.40	5.60
2012	50	15.40	25.30	11.30	1.12	50.89	224.80	45.2	29.1	2.1	1618	1498	6.00	13.20
小计	124	16.13	24.95	11.38	1.18	49.48	224.19	42.8	30.6	2.2	1899	1774	7.77	7.83

### 2.2 研究区储层体积压裂措施

姬源油田王盘山长 8 油藏芦 58-54 井区常规压裂后日产液 1.03 m<sup>3</sup>/d,日产油 0.72 t/d,含水 16.6%,动液面 1958 m,沉没度 42 m。油井生产中动态监测液量变化图显示油井产液量供应不足,需要实施新的改造措施。综合研究认为:王盘山长 8 油

藏平均油层厚度较大,物性相对较好,单井产能偏低,区块平均压力保持水平较高,具备措施增产潜力,适合实施混合水体积压裂。

混合水体积压裂技术原理主要是通过高排量、大液量、低粘度液体压裂的方式将渗流的有效储集体“打碎”,形成网络裂缝<sup>[4]</sup>,使裂缝壁面与储层基

质的接触面积最大,油气从任意方向向裂缝的渗流距离最短,开启天然裂缝并进行有效支撑,形成网状裂缝,极大地提高了储层整体渗透率,实现了对储层的立体改造<sup>[8-9]</sup>。

混合水压裂主要技术参数为:高排量,6.4~15.0 m<sup>3</sup>/min;大液量,1 000~1 500 m<sup>3</sup>/段;大支撑剂量,100~200 t;低黏压裂液,滑溜水或者滑溜水与线性胶和或交联液组合;不同粒径支撑剂,20/40 目和 40/70 目组合;配套连续混配及连续输砂设备。

表 2 2013 年王盘山长 8 试油压裂数据统计

序号	井号	措施完井日期	措施前				措施后初期				目前				初期日增油/t	目前日增油/t	累计增油/t	有效备期/天	注
			日产液/m <sup>3</sup>	日产油/t	含水 %	动液面/m	日产液/m <sup>3</sup>	日产油/t	含水 %	动液面/m	日产液/m <sup>3</sup>	日产油/t	含水 %	动液面/m					
1	芦 51-49	2013-4-6	0.98	0.68	16.8	1942	6.50	4.79	12.3	1189	2.79	1.91	18.6	1808	4.11	1.23	678	249	
2	芦 51-51	2013-4-26	1.46	1.05	14.4	1976	6.00	3.60	28.6	1899	1.13	0.56	40.8	1997	2.55	0.00	313	135	
3	芦 49-51	2013-5-15	0.98	0.70	15.3	2001	9.00	6.68	11.7	1162	5.62	3.84	18.7	1747	5.98	3.14	857	212	
4	芦 58-54	2013-8-11	0.98	0.69	16.3	未测	5.36	2.72	39.6	2026	1.00	0.58	31.0	2052	2.03	0.00	196	102	
合计/平均			1.10	0.78	15.6	1973	6.72	4.45	21.2	1569	2.64	1.72	22.2	1901	3.67	1.09	2044		

### 3 微地震技术评价芦 58-54 井混合水体积压裂效果

为了更好地探索芦 58-54 井体积压裂过程中的破裂发生和发展状况,定量地评价压裂效果,对芦 58-54 井的压裂开展了微地震监测工作。2013 年 7 月 26 日,对芦 58-54 井实施混合水体积压裂施工,在旁侧芦 57-54 井内同步监测。

此次监测目的:确定芦 58-54 井压裂形成主裂缝的展布方向;确定裂缝方位、高度、长度等方面的空间几何信息;现场实时合成微地震监测初步结果;通过后期处理解释得出最终成果,完成对芦 58-54 井的压裂效果全面评价。

### 2.3 研究区储层混合水体积压裂效果分析

王盘山长 8 油藏 2013 年实施体积压裂井 4 口,施工时前置液液量在 350~500 m<sup>3</sup>,排量在 9~10 m<sup>3</sup>/min,使储层裂缝开启,泄油半径增大。措施后初期平均单井日增油 3.67 t/d,累计增油 2 044 t,增油很明显。例如,芦 49-51 井措施后初期液量保持在 9 m<sup>3</sup>/d,含水呈平稳下降趋势。目前生产稳定,日产油 3.84 t,含水 18.7%,动液面 1 747 m,累计措施增油 618 t(表 2)。

2013 年 7 月 25 日,设备到达芦 57-54 井现场,检波器下到接收井芦 57-54 井内,采集空炮弹信号;7 月 26 日下午 2 点开始,芦 58-54 井压裂施工,芦 57-54 井同步监测;7 月 26 日下午 7 点,芦 58-54 井施工结束,检波器提出交井,完成监测。

从芦 58-54 井长 8 层压裂微地震监测结果看(图 2),识别出的所有微地震事件数随时间的变化规律,从图 2 可以看出,自下午 14:29 开始记录到事件发生,压裂过程持续到 19:00 结束,历时 4 个半小时多。图中显示破裂震动主要发生在初期(14:30)和后期(18:00 前后),因中间过程中事件少,所以把事件分成 2 个阶段,大部分事件出现在压裂第二阶段(18:00 前后 30 min 以内),黑色柱状图为每分钟内发生微地震次数。

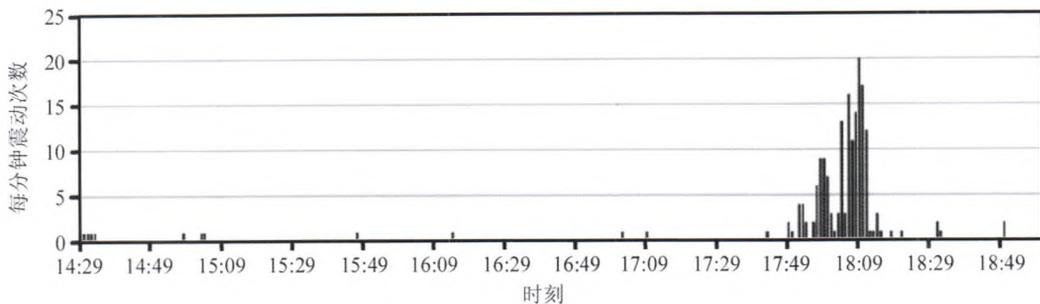


图 2 微地震事件发生时间和频率

芦 57-54 井中监测的微地震事件发生与压裂施工曲线叠合图展示了整个压裂响应过程(图 3)。图 3 中上图为压裂监测的横截面图,记录了微地震沿着井筒发生事件的深度统计(深度 2 590~2 598 m

为射孔段),横向红点反映了距离井筒由近到远微地震事件位置与频次变化。下图为压裂施工曲线与微地震发生频次叠合图,目的是为了更好地了解微地震事件与压裂施工过程的精确对应关系。图中上

面红色曲线为施工压力随时间变化曲线(单位, KPa),下面粉色曲线为套压随时间变化曲线(单位, KPa),绿色为砂比变化曲线(单位, %),蓝色为排量变化曲线(单位, m<sup>3</sup>/min),黑色柱状图为每分钟内发生微地震频次。

现场微地震事件信号定位成果图显示出了微震源的准确位置(图 4)。不同颜色为不同时间段微震发生的方位。因发生破裂震动主要在压裂初期(14:30)和后期(18:00 前后),中间过程中事件少,所以把事件分成 2 个阶段,绿色表示第一阶段微震源方位和频次,红色表示第二阶段(主要阶段)的微震源方位和频次。

处理后的地震事件与现场结果一致(图 4),图 4 中标识圈内事件为处理后高信噪比事件定位结果,展示了微震源即裂缝网络最终定位方位为近南北向,即东北 19.5°,长 315.9 m,宽 104 m(图 4),在井两翼微震源即裂缝均较发育。

研究区未作微地震监测前,普遍认为区域裂缝方位应该北东 75°方向,芦 58-54 北东 19.5°裂缝方向说明局部井区产生了与区域裂缝方位背景不同的新裂缝,能够更好地增加渗流网络。而这种精确的压裂缝方位,延续到了相邻注水井,对油藏精确注水控制和注水调整有非常重要的指导意义。

通过微地震事件的深度范围分析,显示微震源

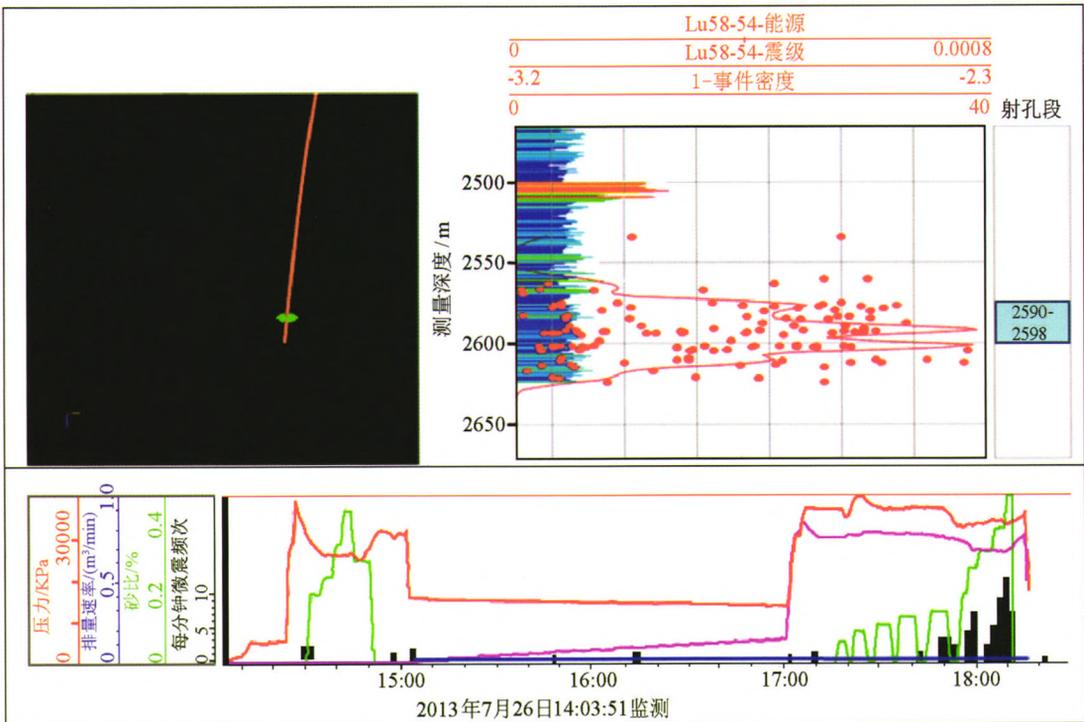


图 3 芦 58-54 井长 8 层压裂施工曲线与微地震事件叠合图

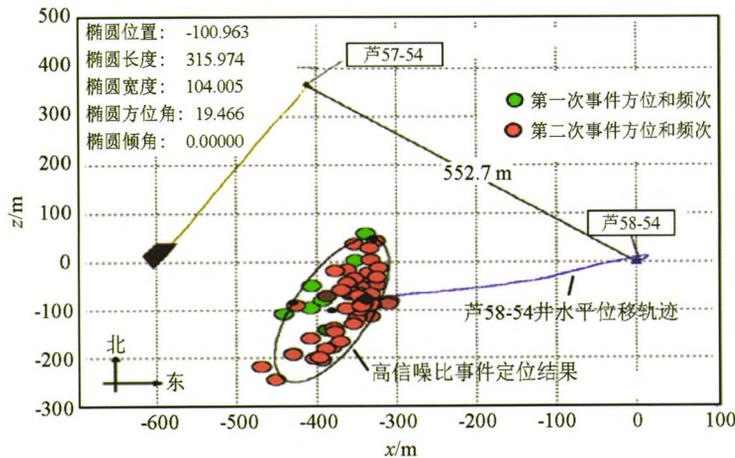


图 4 现场微地震事件信号定位成果

即裂缝网络的高度在 2 520~2 580 m 之间, 约 58 m (图 5)。裂缝方向、深度、体积等参数为油田后期注水开发提供了直接依据。

图 6 为微地震事件密度分布区域立体示意图, 其横边长 450 m、纵边长 300 m、高 100 m。图 6a 为从顶部俯视北东方向微地震事件发生频次的展布情

况, 图 6b 为从西侧直视北和高度方向微地震事件发生频次的展布空间情况。

微地震事件密度分布区域也代表了压裂改造波及体积的范围(图 6), 统计分析结果, 主要事件在长 315.9 m、宽 104 m、高 58 m 空间内, 但裂缝影响波及的范围更大, 储层改造体积约 244.8 万  $\text{m}^3$ 。

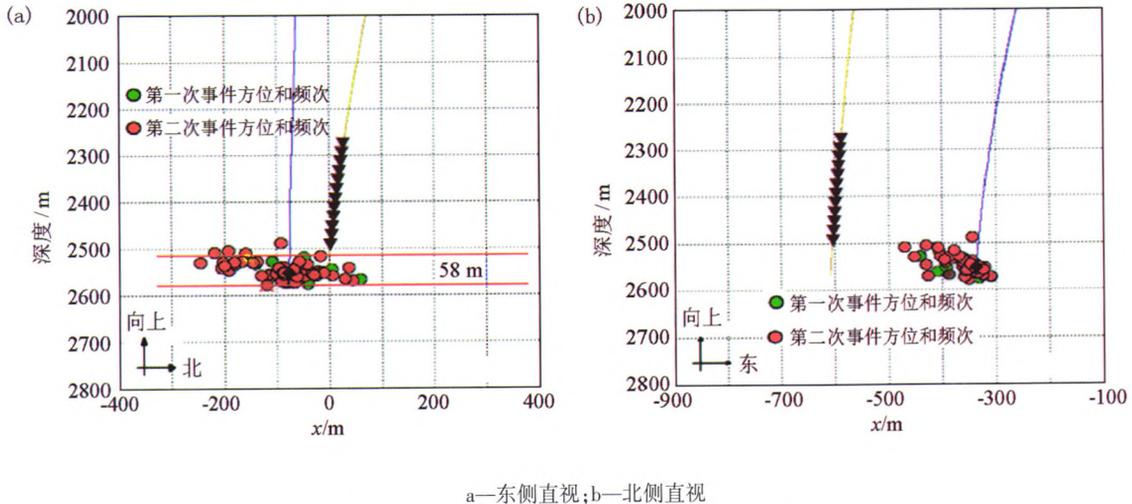


图 5 深度范围分析微震源即裂缝网络的高度

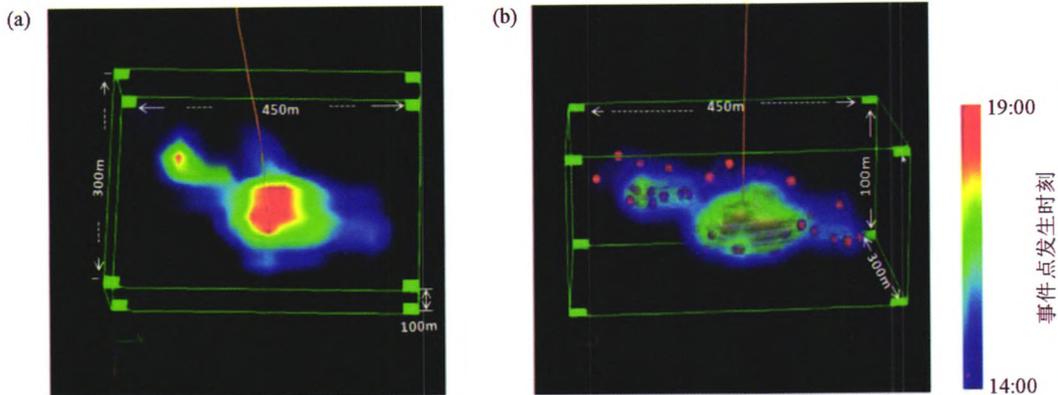


图 6 微地震事件密度分布区域立体示意(2013-07-26 监测)

## 4 结论

微地震监测技术能够通过数据采集、震源成像和精细反演步骤精确定位微地震的震源位置、发震时刻、震源强度等因素, 从而识别出压裂缝的空间几何状态。

芦 58-54 井体积压裂实时地震监测结果显示此次人工造缝的裂缝网络延伸方向为北东  $19.5^\circ$ , 裂缝总长度为 315.9 m、宽 104 m、高度约 58 m, 裂缝网络长宽高达设计要求; 裂缝网络在井旁两翼均较发育, 大部分微地震事件出现在压裂第二阶段; 改造体

积约为 244.8 万  $\text{m}^3$ 。

用微地震监测能够准确定量地反映混合水体积压裂的效果, 且周期短、成本较低, 值得推广。

## 参考文献:

- [1] 刘百红, 秦绪英, 郑四连, 等. 微地震监测技术及其在油田中的应用现状[J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28(5): 325-329.
- [2] 严永新, 张永华, 陈祥, 等. 微地震技术在裂缝监测中的应用研究[J]. 地质前缘, 2013, 20(3): 270-274.
- [3] 路坤桥, 孙玉学. 我国页岩气勘探开发的要点及层位[J]. 河南科学, 2015, 33(2): 257-260.
- [4] 刘建安, 马红星, 慕立俊, 等. 井下微地震裂缝测试技术在长庆油田的应用[J]. 油气井测试, 2005, 14(2): 54-56.
- [5] 芮拥军. 地面微地震水力压裂监测可行性分析[J]. 物探与化

- 探,2015,39(2):341-345.
- [6] 赵二猛,李兴科,尹洪军.裂缝性油藏分段压裂水平井试井模型研究[J].河南科学,2016,34(4):587-591.
- [7] 段建华,王保利,朱红娟,等.微地震监测数据压缩技术[J].物探与化探,2014,38(5):1018-1023.
- [8] 廖鹏,唐骏,庞国印,等.鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长81段储层特征及控制因素分析[J].矿物岩石,2012(2):97-104.
- [9] 卢广利,刘冠华.鄂尔多斯盆地油房庄地区长8储层孔隙结构研究[J].辽宁化工,2012,41(5):515-518.
- [10] 王永辉,卢拥军,李永平,等.非常规储层压裂改造技术进展及应用[J].石油学报,2012,33(1):149-158.
- [11] 王晓东,找振峰,王晓东,等.鄂尔多斯盆地致密油层混合水压裂试验[J].石油钻采工艺,2012,34(5):80-83.
- [12] 雷群,胥云,蒋廷学,等.用于提高低-特低渗透油气藏改造效果的缝网压裂技术[J].石油学报,2012,30(2):237-241.
- [13] 牛欢,潘冬明,周国婷.井中地震 VSP 观测系统正演模拟[J].物探与化探,2013,37(2):280-286.

## The application of micro-seismic monitoring and evaluation technology to evolution of volume fracturing effect in the Jiyuan oilfield

WANG Na-Shen<sup>1</sup>, ZHANG Yi-Dan<sup>2</sup>, HUANG Jia-Xuan<sup>1</sup>, XU Kai-Tong<sup>1</sup>

(1. School of Earth Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. College of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Micro-seismic monitoring technology is an important means to evaluate the fracturing effect of low permeability reservoir and to guide the development of fine water injection in oil reservoir. Through the observation and analysis of micro-seismic events produced by fracturing, the location, size, flow conductivity, geometric shape and local fracture distribution regularity of fractures can be obtained. Wangpanshan Chang 8 reservoir of the Jiyuan oilfield is characterized by low porosity, low permeability and low voltage, and hence production will decrease soon after the conventional fracturing production is conducted for a period. In recent years researchers have carried out mixed water volume fracturing and implemented the micro-seismic monitoring. The monitoring of Lu 58-54 well mixed water volume fracturing results shows that the long slit produced is up to 315.97 m, the seam width is 104 m, the fracture height is about 58 m, the affected volume is about 24.48 million m<sup>3</sup>, and the direction is NE 19.5°. The fracturing has caused the reservoir layer cracks to open and drainage radius to increase, thus increasing the amount of single well production. The effect is very obvious, and the results obtained by the authors lay a solid foundation for further fine development of the reservoir.

**Key words:** micro earthquake real-time monitoring; measurement of mixed water volume fracturing; Jiyuan oilfield; hydraulic fracture geometry

(本文编辑:叶佩)