

·油气钻采工程·

微地震监测技术在非常规油气藏压裂效果综合评估中的应用

李红梅

(中国石化胜利油田分公司 物探研究院, 山东 东营 257022)

摘要:随着非常规油气藏的规模开发,微地震监测作为该类型油气藏水力压裂体积改造设计、实施及评估的关键技术得到了迅速发展。东营凹陷盐227井区作为低孔特低渗透油藏,在进行整体压裂开发的过程中对微地震监测数据进行了采集与处理。通过微地震事件点俯视图投影、沿井轨迹侧视图投影、压裂改造体积及压裂波及前缘面积计算等方法,分析了人工裂缝带的长度、宽度、高度和方位等空间发育特征及其影响范围,综合利用钻录井、测井和三维地震等资料,分析了研究区天然裂缝分布特征、各压裂段岩性组合或沉积相带特征及其对人工裂缝空间分布的影响,综合评估了盐227井区非常规油气藏压裂改造效果,明确了砂砾岩扇体中扇中可压性好于扇根;相对厚层的含砾砂岩比厚度较薄、泥岩夹层多的含砾砂岩的压裂效果更好。

关键词:微地震监测 水力压裂 非常规油气藏 储层改造 人工裂缝

中图分类号:P631.443

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)03-0129-06

Application of micro-seismic monitoring technology to unconventional hydrocarbon reservoir fracturing evaluation

Li Hongmei

(Geophysical Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257022, China)

Abstract: Micro-seismic monitoring, as a technique for the design, implementation and evaluation of hydraulic fracturing volume reformation, has been developing rapidly with the large-scale development of unconventional hydrocarbon reservoir. The sand-gravel reservoir in Yan227 wellblock of Dongying sag has low porosity and very low permeability. Based on micro-seismic monitoring data acquisition and processing of Well Yan227-3HF and Well Yan227-8HF, the development of artificial fracture space, including its length, width, direction and height, and its effective range were analyzed at first through the methods of vertical projection of micro-seismic event point, side projection, calculating of fracturing volume and fracturing frontal area, etc. And then data from drilling, logging, well logging, 3D seismic and fracturing construction process parameter curve were comprehensive utilized, thus the characteristics of natural fracture distribution, the lithology and sedimentary facies belt of each fracture section and their influence on spatial distribution of artificial cracks were analyzed. Finally, the unconventional hydrocarbon reservoir fracturing effect was evaluated comprehensively in Yan227 wellblock area. The results show that the middle-fan section is easier to be fractured compared with the fan root; pebbly sandstone with relatively thick layer has better fracturing effect than the one with thinner layer and multi-interbedded mudstone.

Key words: micro-seismic monitoring; hydraulic fracturing; unconventional hydrocarbon reservoir; reservoir reformation; artificial fracture

微地震监测技术是通过观测生产活动过程中所发生的微地震事件,来分析其影响的地球物理技

收稿日期:2015-03-31。

作者简介:李红梅(1970—),云南江川人,女,高级工程师,博士,从事地震资料综合研究工作。联系电话:(0546)8789733, E-mail:lihongmei519.slyt@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技攻关项目“微地震监测技术及处理系统研发”(P13078)。

术^[1-2]。与常规地震勘探不同,微地震监测的震源位置是未知的,其基础是声发射学和地震学^[3-6]。该技术最早于20世纪40年代被提出^[7],1976年美国桑地亚国家实验室确立了水力压裂诱发微地震的井下观测方法,微地震监测技术可行性得到了广泛的认可^[8],应用领域主要包括岩体施工^[8-10]、地热开发、水力压裂^[11-19]、油气开采^[20-36]等方面。近年来随着页岩油气、致密油气等非常规油气资源的规模开发,微地震监测技术作为水力压裂体积改造设计、实施及评估的关键技术,得到了迅速发展。微地震监测技术不仅可以在压裂过程中监测人工裂缝的产生,还可通过压裂后获得的数据开展综合分析,评估压裂作业效果,为进一步的井位部署、井网调整等提供依据。

盐227井区位于东营凹陷北部陡坡带东段盐18古冲沟的西侧翼,沙四段为近岸水下扇沉积,地层呈楔形分布,由北向南依次为扇根、扇中和扇缘,垂向上多期叠置,岩性以砾岩、含砾砂岩和砂岩为主,为低孔特低渗透砂砾岩体油藏,常规单井压裂效果较差。分析认为只有以“井工厂”模式实行整体压裂开发,才能实现效益开发。盐227井区为了形成横切缝并实现人工裂缝网络控制程度最大化,进行了整体开发方案部署,平面上近南北向呈辐射状钻探水平井,沿北西向进行拉链式分段压裂,水平井轨迹平面投影间的井距为220~430 m,在垂向上分为3层开发,单层厚度70~80 m,并将各层水平井轨迹在平面上的投影错开、实现改造体积交错,最终完钻水平井9口。笔者在研究区微地震数据采集处理的基础上,通过将监测到的微地震事件点数据与钻录井、测井、三维地震及压裂施工过程参数曲线等资料相结合进行综合分析,对储层压裂改造效果进行了综合评估,以期对下一步压裂施工及油气开发提供优化方案。

1 微地震监测数据采集与处理

根据采集方式不同可以将微地震监测技术分为井中观测和地面观测2类^[34-35]。其中,井中观测虽然具有噪音低、精度较高的优点,但是存在监测检波器费用高、施工过程长、成本高且需要关井进而影响其他井正常生产的不足,因此应用相对较少。而地面观测有台站式、阵列式等多种方式,相对于台站式观测系统监测的数据道数少、波场特征难以识别以及事件定位精度低的缺陷,阵列式观测系统在噪音去除、事件定位高等方面具有显著优势。

盐227井区水力压裂过程中使用了千道检波器阵列式地面观测系统来实施监测,共布置南北向7个排列,东西向3个排列,使用检波器876个,最大排列长度为1 650 m,采集得到了射孔和压裂过程中的微地震事件信号。从采集到的数据来看,其射孔信号波场能量较强,直达波同相轴连续性较好,易于追踪;微地震事件信号波场能量较强,与射孔波场具有较好的相似性,易于识别。在资料处理过程中,建立了预处理、静校正、去噪、事件识别、速度模型建立和震源定位的处理流程,采用了两步法静校正技术,借助常规三维地震和微地震强有效事件,校正微地震数据的时距关系;利用双因素工频干扰自动识别、独立分量分离去噪等技术,消除地面存在工业干扰和随机噪音;使用了长短时窗法和数字化判识法,实现在低信噪比情况下对微地震事件的识别;通过自主开发的粒子群模型优化技术,求取了研究区精确的速度模型。并在上述工作的基础上,利用能量扫描法、全波形能量叠加裂缝成像等方法,对有效事件信号点进行了准确定位。最终获得了盐227-3HF井第2—12压裂段和盐227-8HF井第1—3以及第5—12压裂段的微地震事件的空间位置数据。

2 压裂效果综合评估

利用微地震监测数据,通过微地震事件点俯视图投影、沿井轨迹侧视投影、压裂改造体积(*SRV*)及压裂波及前缘面积(*SRF*)计算等方法,分析人工裂缝空间发育特征及其影响范围,同时可结合钻录井、测井、三维地震以及压裂施工过程参数曲线等资料,综合评估非常规油气藏压裂改造效果。

2.1 微地震事件点俯视图投影

微地震事件点俯视图投影即从俯视图角度将事件点以 Z 点坐标为原点,投影在 xy 平面上来分析事件点分布特征。在俯视图投影图上,微地震事件点延伸方向即是人工裂缝带延伸方位,其延伸方向上的长度定义为人工裂缝带长度,相垂直的另一方向为裂缝带宽度。通过统计事件点俯视图投影分布的延伸方位、长度、和宽度等裂缝属性,可以确定人工裂缝分布是否符合压裂设计。

从盐227-3HF井各压裂段的微地震数据点整理后所做的各压裂段的俯视图投影(图1)可以看出,人工裂缝方向主要发育北西向和北东向2组,北西向裂缝方位为 $23^{\circ}\sim 45^{\circ}$,北东向裂缝方位为 $18^{\circ}\sim 45^{\circ}$,而且11段数据中有7段数据发育北西向裂缝,符合

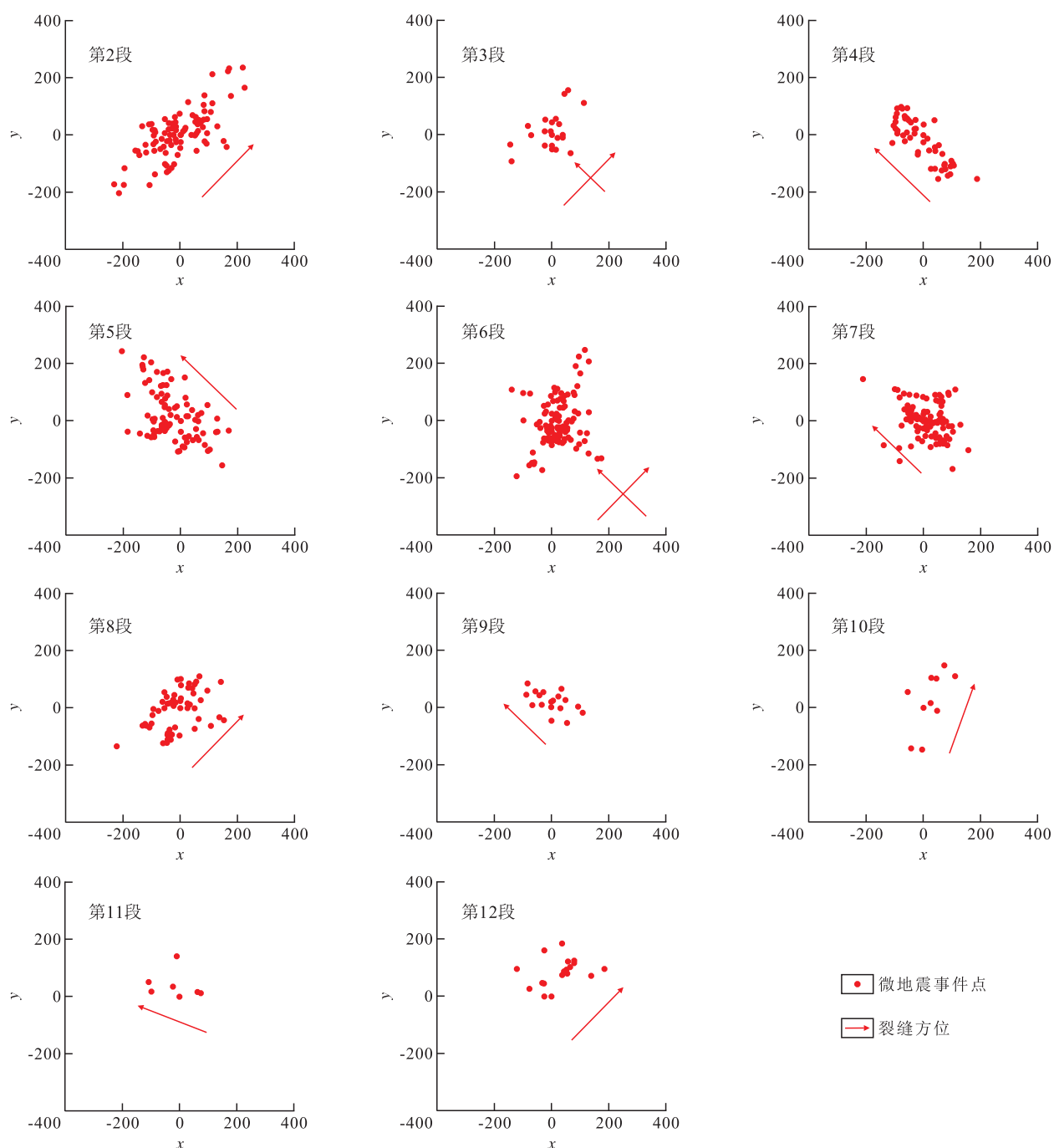


图1 盐227-3HF井各压裂段微地震事件点俯视投影

Fig.1 Vertical view projections of micro-seismic events points in individual fracturing section of Well Y227-3HF

压裂设计。同时,对各压裂段监测到事件点个数、人工裂缝分布的长度和方位统计结果(表1)显示,各压裂段监测人工半缝长均接近或超过设计值,达到了储层改造目的,对其中超过设计值较多的第2,第5—6和第10压裂段分析可知,其多与人工裂缝方向和天然裂缝方向一致有关。从各压裂段统计的事件点个数可以看出,第2—8段监测到事件点较多,分布密集,人工裂缝破裂规模较大,第9—12段监测到事件点相对较少,人工裂缝破裂规模相对较小。

油气藏中微断层和天然裂缝的分布代表了天然应力场的分布特征,天然裂缝对人工裂缝发育具有明显控制作用。为了分析研究区天然裂缝分布与人工裂缝之间的关系,将盐227-3HF井微地震事件点俯视投影与利用曲率分析技术获得的天然裂缝预测结果进行叠合(图2)可以看出,第2压裂段天然裂缝较发育,且其方向与井轨迹近垂直,与人工裂缝方向近一致,从统计的人工裂缝长度可知第2压裂段裂缝长度远大于设计裂缝长度,这应与该压裂段天然裂缝发育有关,表明与钻井轨迹垂直或近

表1 盐227-3HF井微地震事件点裂缝空间分布特征参数统计

Table1 Parametric statistics of spatial distribution of micro-seismic events points of Well Y227-3HF

压裂段	设计半缝长/m	事件点个数	人工半缝长/m	裂缝宽度/m	裂缝高度/m	裂缝方位
2	260	91	319	194	25	NE39°
3	180	22	162	130	25	NW45°/NE39°
4	175	52	148	91	30	NW44°
5	170	86	236	261	35	NW40°
6	160	101	243	126	20	NW44°/NE26°
7	155	92	188	128	30	NW40°
8	140	57	164	185	26	NE43°
9	130	18	116	116	15	NW38°
10	120	10	164	88	20	NE18°
11	95	7	101	36	15	NW23°
12	85	27	90	150	40	NE45°

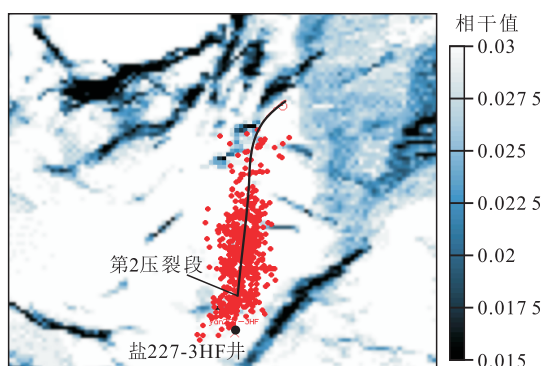


图2 盐227-3HF井微地震事件点俯视图与三维地震裂缝预测叠合分析

Fig.2 Superimposition of the vertical view projection of micro-seismic events points of Well Y227-3HF onto 3D seismic fracture prediction

垂直的天然裂缝在压裂中相对较容易开启,进而在其影响下促进人工裂缝带的延伸。

2.2 微地震事件点沿井轨迹侧视投影

利用微地震事件点沿井轨迹侧视投影可以计算人工裂缝带高度,分析其是否最大程度覆盖储层或者已经压穿储层。在盐227-3HF井各压裂段微地震事件点沿井轨迹侧视投影基础上,详细统计了该井第2—12压裂段的人工裂缝高度(表1),各压裂段裂缝高度为15~40 m,与3层水平井70~80 m的地层单层厚度相比,人工裂缝高度相对较低,没有最大程度覆盖并压穿储层。

2.3 压裂波及前缘面积及压裂改造体积计算

压裂波及前缘面积和压裂改造体积是衡量压裂效果的2个重要参数。压裂波及前缘面积是指在某一平面上人工裂缝影响到的范围(事件点在某一平面的包络面)。压裂改造体积则是指监测到的微

地震事件点散布空间的体积。*SRF*和*SRV*值越大则表明产能区域越大,其对评估压裂效果和计算产能有重要意义。

利用盐227-3HF井和盐227-8HF井压裂过程中获得的微地震监测数据,基于Alpha-shape划分方法分别计算了2口井平面的*SRF*和*SRV*值(表2)。由计算结果可知,盐227-3HF井*SRF*和*SRV*值均明显大于盐227-8HF井,结合压裂参数及微地震监测事件点个数分析可知,盐227-3HF井使用了更多的压裂液、支撑剂并监测到了更多的微地震事件点,显示储层压裂改造规模更大。从2口井压裂后产液量与产油量对比结果来看,盐227-3HF井压裂效果相对更好。

表2 盐227-3HF井和盐227-8HF井压裂效果对比

Table2 Comparison of fracturing effect between Well Y227-3HF and Well Y227-8HF

井号	<i>SRF</i> /m ²	<i>SRV</i> /m ³	压裂液量/m ³	支撑剂量/m ³	事件点个数	产液量/(t·d ⁻¹)	产油量/(t·d ⁻¹)
盐227-3HF	213 007.76	4 253 952.93	7 401 515.4	563	42	25	
盐227-8HF	172 045.65	1 819 397.75	454 300	382	38	7	

综合盐227-3HF井和盐227-8HF井录井资料的岩性统计结果,对2口井压裂效果差异产生的原因进行对比分析。结果表明,2口井的岩性组合特征明显不同,盐227-3HF井主要发育厚层含砾砂岩,而盐227-8HF井砂岩厚度相对较薄,且泥岩隔层较多。由于厚层含砾砂岩具有一定分选性,泥质含量低,物性好,脆性大,可压性相对较好;而薄层含砾砂岩受上下泥岩层泥质重结晶影响较大,灰质胶结作用更强,可压性相对较差。从盐227-3HF井各段事件点个数可看出,第2—8压裂段监测到的事件点较多、分布密集、人工裂缝破裂规模较大,第9—12段监测到事件点相对较少、人工裂缝破裂规模相对较小。分析认为,第2—8压裂段位于砂砾岩扇体前端为扇中或扇缘,而第9—12段在地震剖面上表现为空白反射为扇根。通过不同相带沉积成岩特征可知,扇根分选差、杂基含量高,且经历了早期强压实,后期泥质杂基重结晶,非常致密,不易于压裂;而第2—8段所分布的扇中和扇缘,粒度相对细且有一定分选性,成岩早期抗压实作用强,后期经多期溶蚀作用改造,可压性相对更好。综上所述,岩性或沉积相带决定了地层的岩石结构特征及其成岩演化特征,砂砾岩扇体扇中可压性好于扇根,而厚层含砾砂岩可压性好于泥质夹层较多的薄层含砾砂岩。

3 结论

微地震监测技术可以通过对非常规油气藏压裂改造施工过程中获得的微地震监测数据进行采集和处理,并开展综合分析,评估压裂效果。通过对东营凹陷盐227井区微地震监测获得的数据进行处理解释,并与钻录井、测井和三维地震资料相结合,利用微地震事件点俯视投影技术分别计算各压裂段人工裂缝带长度、宽度和方位等裂缝属性,分析人工裂缝影响范围以及微断层和天然裂缝对人工裂缝发育的控制作用;通过侧视投影技术获取人工裂缝带高度并计算压裂改造体积和压裂波及前缘面积,分析各压裂段岩性组合或沉积相带特征对人工裂缝空间分布的影响,综合评价油气藏压裂改造效果,进而实现对研究区下一步压裂施工及油气开发方案的优化设计。

参考文献:

- [1] 肖淑明,吕志强,郭志华,等.低渗透油藏人工裂缝监测技术在现河地区的应用[J].中国工程科学,2012,14(4):65-69.
Xiao Shuming, Lv Zhiqiang, Guo Zhihua, et al. Application of artificial fracturing for low permeable reservoir in Xianhe region [J]. Engineering Sciences, 2012, 14(4): 65-69.
- [2] 王崇孝,罗群,宋岩,等.纳米石油地质学:非常规油气地质理论与研究方法探讨[J].石油实验地质,2014,36(6):659-667.
Wang Chongxiao, Luo Qun, Song Yan, et al. Nano-meter petroleum geology: Discussion about geology theory and research method of unconventional petroleum [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(6): 659-667.
- [3] Sylvette Bonnefoy-Claudet, Fabrice Cotton, Pierre-Yves Bard. The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies [J]. Earth-Science Reviews, 2006, 79(3): 205-227.
- [4] Li Zhengguang, Yang Runhai, Zhao Jinming, et al. Rock-breaking test research on earthquake sequence type [J]. Journal of Seismological Research, 2005, 28(4): 388-393.
- [5] Zhang Shan, Liu Qinglin, Zhao Qun, et al. Application of micro-seismic monitoring technology in development of oil field [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2002, 41(2): 226-231.
- [6] 刘向军.高速通道压裂工艺在低渗透油藏的应用[J].油气地质与采收率,2015,22(2):122-126.
Liu Xiangjun. Application of Hiway technology in the low permeability reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(2): 122-126.
- [7] 裴琳.微地震监测技术在地下工程中应用研究[J].工程地球物理学报,2008,5(5):554-559.
Pei Lin. Application of microearthquake monitoring technology in subsurface engineering [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2008, 5(5): 554-559.
- [8] 刘建中,刘国华.用微地震监测结果预报水库、矿山有害地震[J].中国工程科学,2012,14(4):45-48.
Liu Jianzhong, Liu Guohua. Use micro-seismic monitoring to forecast hazardous earthquake of water reservoirs and mines [J]. Engineering Sciences, 2012, 14(4): 45-48.
- [9] 赵新红,车航,罗炯.复杂构造环境下京253井人工裂缝监测[J].中国工程科学,2012,14(4):12-15.
Zhao Xinhong, Che Hang, Luo Jiong. Micro-seismic monitoring of Well J-253 in complicated construction [J]. Engineering Sciences, 2012, 14(4): 12-15.
- [10] 吴有亮.复杂构造地区三维微地震监测技术研究及其在工程中的应用[D].成都:成都理工大学,2007.
Wu Youliang. 3D micro-seismic monitoring technology research in complicated structure area and its application in engineering [J]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.
- [11] 曲占庆,周丽萍,曲冠政,等.高速通道压裂支撑裂缝导流能力实验评价[J].油气地质与采收率,2015,22(1):122-126.
Qu Zhanqing, Zhou Liping, Qu Guanzheng, et al. Experimental study on influencing factors of flow conductivity for channel fracturing proppant [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 122-126.
- [12] 刘红磊,韩倩,李颖,等.彭水区块水平井清水连续加砂压裂技术[J].石油钻探技术,2015,43(1):13-19.
Liu Honglei, Han Qian, Li Ying, et al. Water fracturing with continuous sand for horizontal wells in the Pengshui block [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(1): 13-19.
- [13] 王万迅,叶连池,王立治,等.裸空长水平井苏75-70-6H连续压裂微地震监测[J].中国工程科学,2012,14(4):4-7.
Wang Wanxun, Ye Lianchi, Wang Lizhi, et al. Micro-seismic fracturing mapping and fracturing of open-hole long horizontal Well Su75-70-6H [J]. Engineering Sciences, 2012, 14(4): 4-7.
- [14] 蒲春生,陈庆栋,吴飞鹏,等.致密砂岩油藏水平井分段压裂布缝与参数优化[J].石油钻探技术,2014,42(6):73-79.
Pu Chunsheng, Chen Qingdong, Wu Feipeng, et al. Staged fracturing pattern and parameter optimization of horizontal wells in tight sandstone oil reservoir [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(6): 73-79.
- [15] 林海,王俊明,郭玲玲,等.井中微地震监测技术在重复压裂中的应用[J].青海石油,2014,32(1):90-93.
Lin Hai, Wang Junming, Guo Lingling, et al. Well microseismic monitoring technology in the application of the refracturing [J]. Qinghai Oil, 2014, 32(1): 90-93.
- [16] 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.
Lv Shichao, Guo Xiaozhong, Jia Likun. Microseismic monitoring data processing and interpretation of horizontal fracturing wells [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2013, 3(6): 37-42.
- [17] 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. Microseismic monitoring technology of hydraulic fracture and its application [J]. Well Testing, 2012, 21(3): 43-45.
- [18] 段银鹿,李倩,姚韦萍.水力压裂微地震裂缝监测技术及其应

- [J].断块油气田, 2013, 20(5): 644-648.
- Duan Yinlu, Li Qian, Yao Weiping. Microseismic fracture monitoring technology of hydraulic fracturing and its application [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(5): 644-648.
- [19] 熊健, 刘海上, 赵长虹, 等. 低渗透气藏不对称垂直裂缝井产能预测[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(6): 76-79.
- Xiong Jian, Liu Haishang, Zhao Changhong, et al. Study on productivity of asymmetrical vertical fracture well in low-permeability gas reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(6): 76-79.
- [20] 张永华, 陈祥, 杨道庆, 等. 微地震监测技术在水平井压裂中的应用[J]. 物探与化探, 2013, 37(6): 1 080-1 084.
- Zhang Yonghua, Chen Xiang, Yang Daoqing, et al. The application of microseismic monitoring technology to the study of horizontal well fracturing [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2013, 37(6): 1 080-1 084.
- [21] 邱健, 段树法. 微地震监测技术在阳201-H2井压裂中的应用[J]. 天然气勘探与开发, 2013, 36(4): 49-53.
- Qiu Jian, Duan Shufa. Application of microseismic monitoring technology to Yang201-H2 well fracturing [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2013, 36(4): 49-53.
- [22] 郑爱萍, 刘强, 田永鹏, 等. 微地震水力压裂监测技术在浅层石炭系火山岩油藏中的应用[J]. 特种油气藏, 2012, 19(1): 120-123.
- Zheng Aiping, Liu Qiang, Tian Yongpeng, et al. Hydraulic fracturing evaluation with micro-seismic monitoring technique for shallow Carboniferous volcanic rock reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(1): 120-123.
- [23] 王国顺, 刘建中, 柳林旺. 微地震方法检测镇泾油田长8油藏压裂、注水效果分析[J]. 中国工程科学, 2012, 14(4): 40-44.
- Wang Guoshun, Liu Jianzhong, Liu Linwang. Analysis of using microseismic monitoring to verify fracturing and waterflood on reservoir Chang8 of Zhenjing oilfield [J]. Engineering Sciences, 2012, 14(4): 40-44.
- [24] 杨志冬, 周金燕, 常智勇, 等. 利用注水前缘监测技术跟踪水推速度[J]. 中国工程科学, 2012, 14(4): 31-33.
- Yang Zhidong, Zhou Jinyan, Chang Zhiyong, et al. Using waterflood front monitoring to track the speed of water flow drive [J]. Engineering Sciences, 2012, 14(4): 31-33.
- [25] 董世泰, 高红霞. 微地震监测技术及其在油田开发中的应用[J]. 石油仪器, 2004, 18(5): 5-8.
- Dong Shitai, Gao Hongxia. Micro-seismic monitoring technology and its application to oilfield development [J]. Petroleum Instruments, 2004, 18(5): 5-8.
- [26] 马继升. 微地震监测技术在大庆油田A区块井网设计中的应用[J]. 中国工程科学, 2012, 14(4): 74-76.
- Ma Jisheng. Application of microseismic monitoring technology in Daqing Oilfield A block well net design [J]. Engineering Sciences, 2012, 14(4): 74-76.
- [27] 张山, 刘清林, 赵群, 等. 微地震监测技术在油田开发中的应用[J]. 石油物探, 2002, 41(2): 226-231.
- Zhang Shan, Liu Qinglin, Zhao Qun, et al. Application of micro-seismic monitoring technology in development of oil field [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2002, 41(2): 226-231.
- [28] 荣宁, 吴迪, 韩易龙, 等. 微地震监测水驱前缘技术在哈得双台阶水平井的应用效果评价[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(2): 94-96.
- Rong Ning, Wu Di, Han Yilong, et al. Application evaluation of microearthquake monitoring waterflood front technique used to dual step horizontal wells in Hade oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(2): 94-96.
- [29] 李国永, 朱福金, 任利斌, 等. 微地震注水前缘监测技术在高尚堡中深层油藏的应用[J]. 特种油气藏, 2010, 17(4): 104-106.
- Li Guoyong, Zhu Fujin, Ren Libin, et al. Application of microseismic technology in monitoring waterflood front in Gaoshangpu mid-deep reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2010, 17(4): 104-106.
- [30] 刘行军, 杨双定, 谢刚, 等. 鄂尔多斯盆地合水地区长8段裂缝发育特征及其对产量的影响[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(6): 57-60.
- Liu Xingjun, Yang Shuangding, Xie Gang, et al. The study of relationship between fracture characteristic and yield of Chang8 section in Heshui area, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(6): 57-60.
- [31] 张克银. 川西孝泉一新场地区须家河组四段裂缝分布特征[J]. 石油实验地质, 2014, 36(4): 398-404.
- Zhang Keyin. Fracture distribution characteristics of 4th member of Xujiahe Formation in Xiaoquan-Xinchang area, western Sichuan [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(4): 398-404.
- [32] 刘建中, 王春耘, 刘继民, 等. 用微地震法监测油田生产动态[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 71-73.
- Liu Jianzhong, Wang Chunyun, Liu Jimin, et al. Micro-seismic monitor on the operation of oil fields [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(2): 71-73.
- [33] 刘建中, 冯涛, 员增荣, 等. 注水前缘监测及井周应力状态[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2 409-2 412.
- Liu Jianzhong, Feng Tao, Yuan Zengrong, et al. Observation of flood front and stress state around well [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2 409-2 412.
- [34] 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 technique and its application in oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Science & Technology, 2013, 23(3): 12-15.
- [35] 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 fracture monitoring should be carried out in wells [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(4): 138-142.
- [36] Yang Ruizhao, Zhao Zhengguang, Peng Weijun, et al. Integrated application of 3D seismic and micro-seismic data in the development of tight gas reservoirs [J]. Applied Geophysics, 2013, 10(2): 157-169.