

压裂裂缝地面微地震监测技术

左立娜¹,袁和平¹,刘志娟²,盛守东¹,才辉¹,王鹏³

1. 中国石油大庆油田有限责任公司第五采油厂 黑龙江大庆 163513

2. 中国石油华北油田分公司第一采油厂 河北任丘 062552

3. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司油气井测试分公司 河北廊坊 065007

通讯作者:Email:zlina@petrochina.com.cn

引用:左立娜,袁和平,刘志娟,等. 压裂裂缝地面微地震监测技术[J]. 油气井测试,2019,28(3):61-66.

Cite: ZUO Lina, YUAN Heping, LIU Zhijuan, et al. Surface micro-seismic monitoring technology for fractured fractures[J]. Well Testing, 2019,28(3):61-66.

摘要 为明确薄差油层压裂裂缝形态、走向,验证砂体发育特征,建立了注采井驱动关系,开展压裂裂缝地面微地震监测。按要求埋置三分量检波器,在仪器放置点各连接一套监测仪器系统检测储层压裂过程中地层发生破裂形成的声波,以此确定裂缝方位、形态,判断平面及纵向油层发育存在的差异。5口井压裂监测结果表明,砂体发育与裂缝波及体积呈正相关性,表外差层裂缝延伸能力差,波及孔隙体积与压裂液规模相当;表内薄差层裂缝延伸能力强,波及孔隙体积大于压裂液体积。多层合段压裂时缝间干扰界限在1.5 m,隔层厚度小于界限时,裂缝延伸相互抑制,形态无法区分。裂缝形体及走向与砂体非均质性关系明显,纵向上发育越好的层裂缝能量剖面越大,平面上发育越好的方向裂缝能量剖面延伸越明显。应用压裂裂缝地面微地震监测技术,有助于分析裂缝形态、走向及砂体发育特征,有效指导压裂方案设计。

关键词 压裂;裂缝;地面微地震监测;砂体发育;缝间干扰;方案设计**中图分类号**:TE355 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.03.011

Surface micro-seismic monitoring technology for fractured fractures

ZUO Lina¹, YUAN Heping¹, LIU Zhijuan², SHENG Shoudong¹, CAI Hui¹, WANG Peng³

1. NO.5 Oil Production Plant of PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163513, China

2. No. 1 Oil Production Plant of PetroChina North China Oil & Gas Company, Renqiu, Hebei 062552, China

3. Well Testing Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Langfang, Hebei 065007, China

Abstract: In order to clarify the shape and trend of fractured fractures in thin and bad reservoirs and verify the development characteristics of sand bodies, the driving relationship of injection-production wells was established, and surface micro-seismic monitoring of fractured fractures was carried out in this paper. In order to determine the orientation and shape of fractures, and to judge the reservoir development difference between horizontal direction and vertical direction, the three-component geophone was buried according to the requirements and a set of monitoring instrument system was connected at each point of the instrument placement to detect the acoustic wave caused by breakdown of formation during fracturing. The fracturing monitoring results of five wells show that the sand body development was positively correlated with the volume affected by the fracture. The fracture extension ability of the outer bad layer was poor, and the sweep pore volume was equal to the scale of fracturing fluid. However, the fracture extension ability of the inner thin and poor layer was strong, and the sweep pore volume was larger than the fracturing fluid volume. When multiple layers were fractured together, the interval interference limit was 1.5 m, and when the thickness of the barrier was less than the limit, the fracture extension was mutually restrained, and the shape cannot be distinguished. When the relationship between fracture shape, strike and heterogeneity of sand body was obvious, the fracture energy profile of the layer with better vertical development was larger, and the fracture energy profile extended more obviously in the direction with better horizontal development. The application of surface micro-seismic monitoring technology for fractured fracture is helpful to analyze fracture morphology, strike and sand body development characteristics, thus effectively guiding the design of fracturing scheme.

Keywords: fracturing; fracture; surface micro-seismic monitoring; sand-body development; fracture interference; scheme design

地面微地震监测技术是利用储层压裂过程中地层发生破裂产生的高能量以声波的形式传递到

地面,利用多个检波器采集破裂形成的声波,通过数学处理手段,描述压裂过程中的能量分布来确定

裂缝的方位、形态的技术^[1-4]。微地震监测设备主要包括记录仪、GPS定位仪、三分量检波器等^[5]。监测过程中,按照裂缝监测施工设计方案^[6],根据GPS卫星定位仪的引导,在野外找到仪器系统放置点^[7]。远离井场和高压输电线路(大于50 m)等噪音源,调整各监测点仪器监测系统的具体位置^[8-9]。按要求埋置三分量检波器,并在仪器放置点各放置一套监测仪器系统^[10-11]。调整仪器参数,连接电源电池和三分量检波器、GPS卫星授时定位信号线缆,启动监测软件,监测开始^[12]。在仪器监测过程中,填写原始记录并收集压裂过程中的相关资料^[13]。

近年来,很多研究人员对压裂裂缝地面微地震监测技术进行了研究,并取得了一定成果。李红梅^[14]在盐227井区应用微地震监测技术,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,明确了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。钟尉等^[15]应用基于偏移叠加的四维能量聚焦地面微地震成像技术,描述了压裂诱导裂缝的位置、方位和大小及复杂程度。周健等^[16]采用地面测斜仪进行了压裂裂缝监测,获得了每条压裂裂缝的方位与长度,并认为由于诱导应力场的影响,使得部分井段压裂裂缝的复杂性增加,从而增大了改造体积,改善了压裂效果。梁冬等^[17]通过井下微地震、地面微地震、正交偶极声波测井及数值模拟等四种监测方式对比,认为压裂裂缝高随着缝长的延伸呈衰减规律。辛莹娟等^[18]在南泥湾油田实施压裂井裂缝及井下压力-温度实时监测,获得多井人工裂缝方位、长度、高度等几何尺寸,认为裂缝的长度与压裂规模呈正相关关系。高东伟等^[19]应用微地震实时监测技术,确定了页岩气井压裂方案优化及现场实时工艺调整的适用性。褚春波等^[20]通过径向井辅助压裂技术确定了裂缝引导效果的影响程度。

但上述研究对象多为压裂裂缝本身的几何形态,对同一口井中不同发育状况的各层段压裂规模如何控制,以及不同隔层厚度的各层段缝间干扰界限等并未进行深入研究及分析^[21]。为确定合理的压裂规模,提高投入产出比,在以薄差油层为主要开采对象的二、三次加密井的压裂过程中,应用压裂裂缝深度微地震监测技术,探索施工参数与裂缝形态关系,指导方案优化^[22]。

1 裂缝监测施工情况

本次现场共进行5口井压裂监测,根据压裂层

段数确定了监测层段数。现场布置同心圆监测网,对数据进行采集,并进行处理解释。结合施工参数与裂缝参数解释结果,得出了裂缝与砂体发育的关系,证明了砂体发育相关特性^[23-24]。

1.1 试验井井况

试验应用的5口井,油层发育均为薄差层,井深在1 000~1 100 m,井下技术状况良好,无套损。1号井按照10个层段进行压裂施工,压裂层段射开砂岩7.6 m,有效1.1 m;2号井按照9个层段进行压裂施工,压裂层段射开砂岩9.9 m,有效1.6 m;3号井按照1个层段压裂施工,射开砂岩1.9 m,有效0.3 m;4号井按照2个层段压裂施工,压裂层段射开砂岩2.2 m,有效0.4 m;5号井按照3个层段压裂施工,压裂层段射开砂岩3.8 m,不发育有效厚度。施工过程中对所有层段进行了压裂监测。

1.2 数据采集及处理

1号井和2号井以两口井中心为圆心,其余3口井以井口为圆心,布置5圈同心圆监测网,半径分别为200 m、250 m、300 m、350 m和400 m,每圈设置12个检波点,整体成放射状(图1)。采用环型设计可以用同样数量的检波器实现最大的有效数据采集;同心圆监测网设计考虑了监测方位角的均匀性,保证数据的一致性。实际布点与设计点误差在30 m以内,埋深大于1.2 m,GPS定位精度达到 10^{-6} s,以保证能够精确、详细的记录检波器测点。

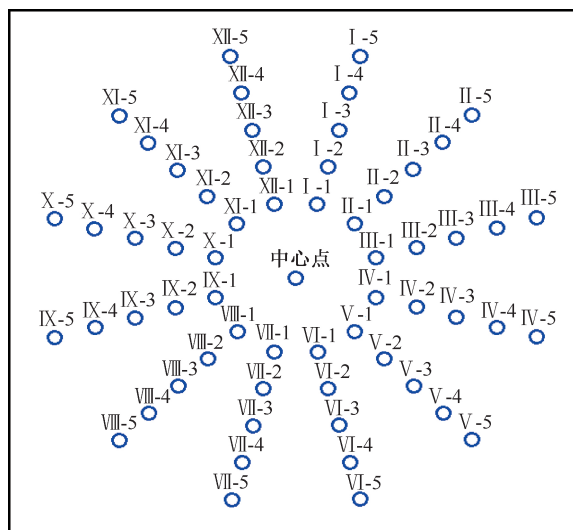


图1 记录仪检波点设计示意图

Fig.1 Design of geophone point of recorder

深度微地震数据处理过程主要包括四个阶段:

(1)初始准备:包括数据格式转换、地震波速度模型的建立和创建走时表;

- (2)数据预处理:挑选不同时段的数据、滤波、去除噪音等,准备批处理目录及数据;
- (3)影像扫描:计算不同时段的破裂能量空间分布,输出数据;
- (4)解释:根据破裂能量空间时间分布,解释破裂的空间、时间尺度。

2 效果分析

裂缝监测解释成果能够反映压裂后地层的状

态,合理运用分析数据,能够有效指导压裂方案的优化^[25-26]。分析本次解释成果认为,砂体发育与裂缝波及体积具有相关性,进一步明确缝间干扰界限,验证了砂体的发育特性。

2.1 砂体发育与裂缝波及体积的相关性

1 号井原始地层压力 11.3 MPa,主要发育表外储层,砂岩厚度在 0.3~1.2 m,孔隙度 17%,渗透率仅为 6 μm^2 。该井压裂施工参数及裂缝检测解释结果见表 1。

表 1 1 号井压裂裂缝参数汇总统计表
Table 1 Statistical table of fracture parameters of well No.1 after fracturing

压裂 层段	砂岩 厚度/ m	有效 厚度/ m	孔隙 度/ %	渗透 率/ μm^2	孔数	沉积相	施工参数				解释参数					
							压裂 液/ m^3	砂量/ m^3	破裂 压力/ MPa	排量/ $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$	波及 体积/ m^3	波及 面积/ m^2	波及孔 隙体积/ m^3	波及孔 隙体积与 液量比值	东西 缝长/ m	南北 缝长/ m
1 号层	0.7		0.17 0.17	6 6	4	表外 表外	85	14	49	3.2	502.8	1 563.0 1 803.2	85.5	1.01	41.8 50.5	47.2 47.7
2 号层	1.2	0.9	0.25	56	3	主体	45	6	47	2.4	359.8	1 988.7	90.7	2.01	42.6	57.2
3 号层	0.3		0.17	6	2	表外	50	7	51	2.0	327.0	2 141.1	55.6	1.11	50.1	53.9
4 号层	0.6		0.17	6	4	表外	85	14	49	3.2	479.6	2 355.5	81.5	0.96	55.9	54.8
5 号层	1.1		0.17 0.17	6 6	4	表外 表外	85	14	51	3.2	548.0	1 662.6 1 409.7	93.2	1.10	50.2 36.6	38.2 50.3
6 号层	0.8	0.2	0.19	25	2	非主体	70	7	50	2.0	507.0	2 806.9	96.3	1.38	65.6	50.4
7 号层	0.5		0.17 0.17	6 6	4	表外 表外	100	14	51	3.2	668.4	1 144.6 2 459.9	113.6	1.14	34.9 63.0	42.0 52.0
8 号层	0.7		0.17	6	2	表外	70	7	54	2.0	430.6	3 858.2	73.2	1.05	69.0	70.0
9 号层	1.2		0.17	6	4	表外	100	14	49	3.2	680.0	3 501.5	115.6	1.16	62.9	65.6
10 号层	0.5		0.17	6	2	表外	80	7	49	2.0	494.6	3 433.5	84.1	1.05	84.7	62.0

从表 1 的监测解释成果可见,表外差层存在填坑效应,即波及孔隙体积与液量规模相当。例如 1 号层的压裂液用量为 85 m^3 ,参数解释的波及孔隙体积为 85.5 m^3 ,二者体积接近。分析认为,表外差层孔隙度小,渗透率低,压裂后裂缝延伸能力差,压裂液仅能充填与自身体积相当的孔隙体积。为此,在进行方案设计时,为保证压裂效果,对此类储层需加大施工规模。

表内薄差层存在骨牌效应,即波及孔隙体积大于液量体积。例如 2 号层的压裂液用量为 45 m^3 ,参数解释的波及孔隙体积为 90.7 m^3 ,二者比值为 2.01。分析认为,2 号层为表内薄差层,砂体发育相对较好,孔隙度与渗透率相对较高,裂缝延伸能力强,压裂液可随着裂缝进入较远的地层,波及的孔隙体积也就相对较大。因此,对于此类储层在规模优化上需根据井距合理控制施工规模。

通过能量体监测发现了裂缝波及体积与砂体发育具有相关性,即同一沉积相下,随着施工规模的增加,压裂的波及孔隙体积增大;相同施工规模

条件下,砂体发育越好,裂缝波及体积越大。这一认识能够为不同发育砂体参数优化设计提供指导。

2.2 明确缝间干扰界限

微地震监测进一步明确了缝间干扰界限,为进一步合卡压裂、降低施工成本提供了理论依据。早期针对二三次加密井开展的细分控制压裂试验,发现了缝间干扰现象,并通过数值模拟及现场试验摸索出缝间干扰规律。在裂缝条数相同的条件下,随着缝间距的增加受干扰的裂缝宽度逐渐变大;在缝间距相同的条件下,裂缝条数越多缝间距对裂缝宽度的影响程度越严重。但限于当时裂缝监测技术,并未进行压裂监测验证。为此,本次通过深度微地震测试进一步明确了缝间干扰界限,为今后卡段划分降低施工难度及费用提供理论支持。本次监测结果表明,对于合层压裂的层段,隔层厚度大于 2.0 m 的储层限流法压裂可明显识别多条裂缝;隔层厚度介于 1.5~2.0 m 的储层,多条裂缝能量有重叠,仍可识别;隔层厚度小于 1.5 m 的储层裂缝能量完全重叠,目前本监测技术识别不了。1 号井不同

隔层厚度的能量纵向切片图表明,当隔层厚度大于 1.5 m 时,裂缝形态扩展较为正常(图 2-4);当隔层厚度小于 1.5 m 时,裂缝延伸相互抑制,导致裂缝形

态无法区分(图 5)。为此,在今后现场试验过程中,隔层厚度大于 1.5 m,且岩性相近的 2~3 个小层可实施合卡压裂,降低施工卡段数。

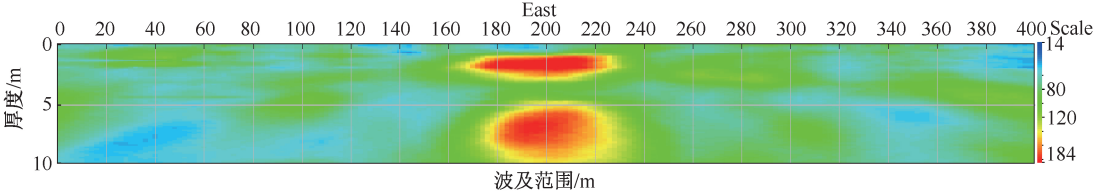


图 2 隔层厚度 7.2 m 能量纵向切片图
Fig.2 Longitudinal slice of energy when the thickness of interlayer is 7.2 m

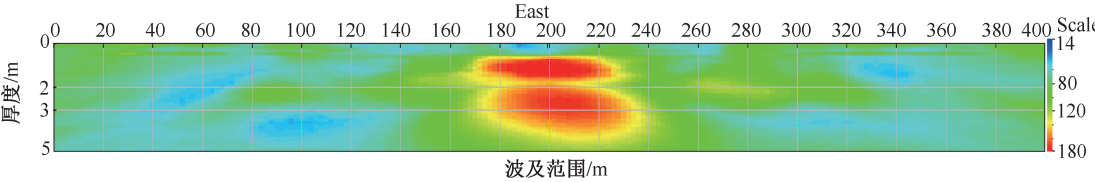


图 3 隔层厚度 1.9 m 能量纵向切片图
Fig.3 Longitudinal slice of energy when the thickness of interlayer is 1.9 m

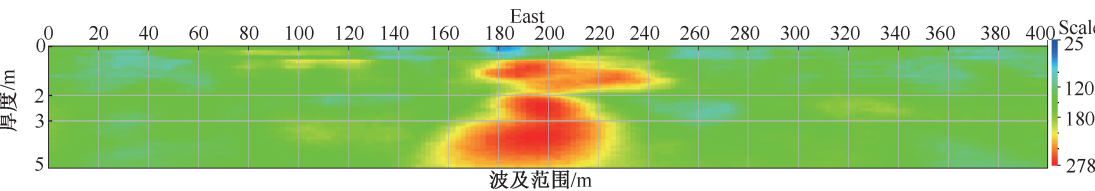


图 4 隔层厚度 1.6 m 能量纵向切片图
Fig.4 Longitudinal slice of energy when the thickness of interlayer is 1.6 m

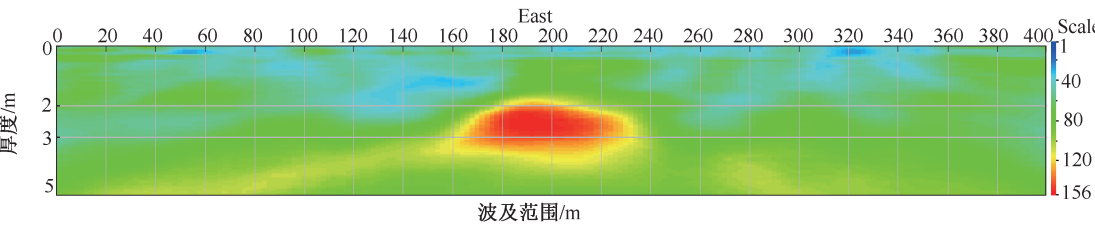


图 5 隔层厚度 1.0 m 能量纵向切片图
Fig.5 Longitudinal slice of energy when the thickness of interlayer is 1.0 m

2.3 裂缝监测验证砂体发育特性

将不同砂体裂缝能量最为集中部分剖面等比例投射到砂体上发现,裂缝并不是一个均匀的圆饼型,而是一个不规则圆形,在某个方向会发生突进。1 号井和 2 号井不同砂体发育状况的裂缝能量分布情况如图 6 和图 7 所示。以 2 号井为例,对比图 6 和图 7 可见,1 号砂体的裂缝能量剖面投射面积明显小于 2 号砂体的裂缝能量剖面投射面积,这进一步证明了砂体纵向上的非均质性;另外在同一砂体中,裂缝能量剖面投射图并不是圆形,而是不规则形状,这也证明了砂体在平面上的非均质性。由于本次监测井少,对比数据较少。为此,在今后应进一步开展压裂监测,摸索压裂平面形态与砂体发

育、动用的关系,指导油水井开发调整。

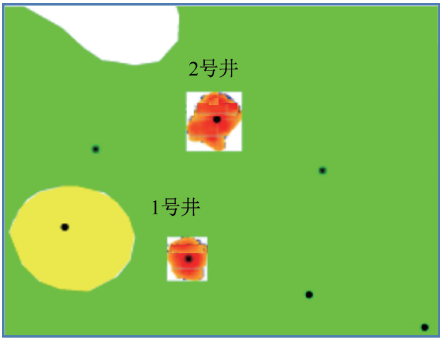


图 6 1 号砂体裂缝能量剖面投射图
Fig.6 Energy profile projection map of fracture for NO.1 sand body

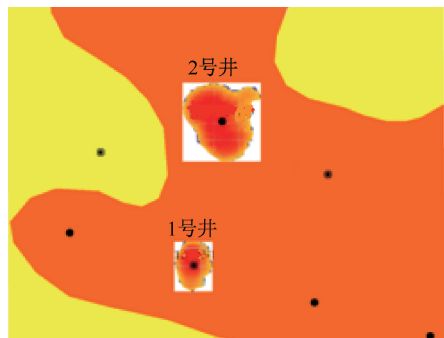


图7 2号砂体裂缝能量剖面投影图

Fig.7 Energy profile projection map of fracture for NO.2 sand body

鉴于这个认识结果,在进行压裂方案设计时,应充分考虑油水井单层的对应关系、砂体展布情况,最大程度改善开发效果的同时,实现效益最大化。

3 结论

(1)压裂裂缝地面微地震监测技术能够提高储层发育及改造状况的认识程度,在改善油田开发效果,控制产量递减上能够起到较好的支撑作用。

(2)压裂裂缝地面微地震监测技术对注采井压裂方案的优化设计可起到一定的借鉴参考作用,尤其是在挖潜薄差层剩余潜力方面适用范围较广。

(3)多层合段压裂时由于存在缝间干扰,裂缝延伸相互抑制,形态无法区分,可深入研究高精度监测技术,为压裂层段优化设计提供技术支撑。

致谢:论文编写过程中,得到了大庆油田采油五厂压裂技术相关人员的大力支持和帮助,在此表示衷心感谢。

参考文献

[1] 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): 1080-1084.
ZHANG Yonghua, CHEN Xiang, YANG Daoqing, et al. The application of micro-seismic monitoring technology to the study of horizontal well fracturing [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2013, 37(6): 1080-1084.

[2] 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. Micro-seismic monitoring technology and its application in oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Science & Technology, 2013, 23(3): 12-15.

[3] 刘畅,付军辉,孙海涛. 微地震技术在地面井压裂监测中的应用[J]. 中州煤碳, 2016(6): 40-43, 48.
LIU Chang, Fu Junhui, Sun Haitao. Application of micro-earthquake technology in fracture monitoring of on-ground well [J]. Zhongzhou Coal, 2016(6): 40-43, 48.

[4] 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): 62-68.
LIU Yaowen, LIAO Rugang, ZHANG Yuan, et al. Application of surface-downhole combined microseismic monitoring technology in the Fuling shale gas field and its enlightenment [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(10): 62-68.

[5] 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. Monitoring technology and application of non-conventional fracturing microearthquake [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2016, 30(1): 142-145.

[6] 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. The application of downhole microseismic monitoring technology in shale gas “well factory” hydraulic fracturing [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(4): 102-107.

[7] 刘建升,杨永刚,张红岗,等. 微地震监测技术在暂堵压裂工艺中的应用[J]. 石油化工应用, 2016, 35(8): 68-73.
LIU Jiansheng, YANG Yonggang, ZHANG Honggang, et al. Application of micro-seismic fracturing monitoring technology in temporary plugging and reoriented fracturing [J]. Petrochemical Industry Application, 2016, 35(8): 68-73.

[8] 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.

[9] 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 down-hole microseismic fracture monitoring technology in horizontal well [J]. Well Testing, 2015, 24(3): 59-61.

[10] 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.
RUI Yongjun. Feasibility analysis of surface micro-seismic hydraulic fracturing monitoring [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(2): 341-345.

[11] 仲岩磊. 压裂裂缝微地震监测技术研究[J]. 内蒙古石油化工, 2015, 41(S1): 109-110.
ZHONG Yanlei. Research on micro-seismic monitoring technology of fracture [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2015, 41(S1): 109-110.

[12] 王树军,张坚平,陈钢,等. 水力压裂裂缝监测技术[J]. 吐哈油气, 2010, 15(3): 270-273, 278.
WANG Shujun, ZHANG Jianping, CHEN Gang, et al. Hydraulic fracture monitoring technology [J]. Tuha Oil

- and Gas, 2010,15(3):270-273,278.
- [13] 田树宝,雷刚,杨立敏,等. 微裂缝发育储层分段压裂水平井裂缝参数预测[J]. 石油与天然气地质,2017,38(2):400-406.
TIAN Shubao, LEI Gang, YANG Limin, et al. A novel method to interpret fracture parameters of multistage fractured horizontal well in reservoirs with micro-fractures [J]. Oil & Gas Geology, 2017,38(2):400-406.
- [14] 李红梅. 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[J]. 油气地质与采收率,2015,22(3):129-134.
LI Hongmei. Application of micro-seismic monitoring technology to unconventional hydrocarbon reservoir fracturing evaluation [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015,22(3):129-134.
- [15] 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 of South Sichuan [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2014,4(6):71-74.
- [16] 周健,张保平,李克智,等. 基于地面测斜仪的“井工厂”压裂裂缝监测技术[J]. 石油钻探技术,2015,43(3):71-75.
ZHOU Jian, ZHANG Baoping, LI Kezhi, et al. Fracture monitoring technology based on surface tiltmeter in “well factory” fracturing [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015,43(3):71-75.
- [17] 梁冬,张欢,温柔,等. 压裂缝高监测技术在安塞油田的对比应用[J]. 石油化工应用,2015,34(3):23-27.
LIANG Dong, ZHANG Huan, WEN Rou, et al. The comparison and application of fracturing height monitoring technology used in Ansai Oilfield [J]. Petrochemical Industry Application, 2015,34(3):23-27.
- [18] 辛莹娟,黄春梅,于雪,等. 延长油田压裂裂缝监测技术应用研究[J]. 科技创新与应用,2015(12):92.
XIN Yingjuan, HUANG Chunmei, YU Xue, et al. Application of fracture monitoring technology in Yanchang Oilfield [J]. Technology Innovation and Application, 2015(12):92.
- [19] 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.
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.
- [20] 褚春波,郭权,黄小云,等. 有限元分析径向水力压裂裂缝扩展影响因素[J]. 油气井测试,2018,27(2):59-66.
CHU Chunbo, GUO Quan, HUANG Xiaoyun, et al. Finite-element analysis on influencing factors for propagation of fractures induced in radial jet hydraulic fracturing [J]. Well Testing, 2018,27(2):59-66.
- [21] 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 Xin'an. Understanding and application of micro-seism monitoring over staged fracturing in horizontal wells for shale gas development [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2017,24(1):170-174.
- [22] 刘玉海,徐克彬,任勇强,等. 向量叠加的压裂裂缝时差定位技术[J]. 油气井测试,2017,26(2):41-43.
LIU Yuhai, XU Kebin, REN Yongqiang, et al. Positioning technology of fracturing time by vector superposition [J]. Well Testing, 2017,26(2):41-43.
- [23] 刘博,苗红波,徐刚,等. 微地震同步压裂监测技术研究与应用[J]. 钻采工艺,2017,40(4):53-55.
LIU Bo, MIAO Hongbo, XU Gang, et al. Study on micro-seismic monitoring of synchronous fracturing and its applications [J]. Drilling & Production Technology, 2017,40(4):53-55.
- [24] 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 microseismic monitoring technique for shallow Carboniferous volcanic rock reservoirs [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2012,19(1):120-123.
- [25] 张守江,郑恒,穆景福,等. 致密气藏水平井水力压裂簇间距优化研究[J]. 油气井测试,2017,26(3):5-9,14.
ZHANG Shoujiang, ZHENG Heng, MU Jingfu, et al. Study on optimization of hydraulic fracturing cluster spacing to horizontal well in dense gas reservoir [J]. Well Testing, 2017,26(3):5-9,14.
- [26] 温庆志,刘华,李海鹏. 油气井压裂微地震裂缝监测技术研究与应用[J]. 特种油气藏,2015,22(5):141-144.
WEN Qingzhi, LIU Hua, LI Haipeng, et al. Research and application of fracture microseismic monitoring during fracturing in oil-gas wells [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2015,22(5):141-144.

编辑 刘振庆

第一作者简介:左立娜,女,1980年出生,高级工程师,2004年毕业于大庆石油学院石油工程专业,现从事采油工艺研究工作。电话:0459-4597577,18045906387;Email:zlina@pet-rochina.com.cn。通信地址:黑龙江省大庆市红岗区杏南中心村杏南东街10-6号,邮政编码:163513。