

渤中 25-1 油田低渗透储层水平井分段压裂先导试验

刘 鹏,许 杰,徐 刚,陈 毅,韩耀图

中海石油(中国)有限公司天津分公司 天津 300459

通讯作者:Email: liupeng50@cnooc.com.cn

项目支持:“十三五”国家科技重大专项“渤海油田高效开发示范工程”(2016ZX05058)

引用:刘鹏,许杰,徐刚,等. 渤中 25-1 油田低渗透储层水平井分段压裂先导试验[J]. 油气井测试, 2018,27(3):52-57.

Cite: LIU Peng, XU Jie, XU Gang *et al.* Pilot test of horizontal well staged fracturing for low permeability reservoirs in BZ25-1 oilfield [J]. Well Testing, 2018, 27(3):52-57.

摘要 渤中 25-1 油田是海上典型的低渗透油田,存在埋藏深、岩性致密、异常高温高压、储层品质差,小层多跨度大、单井自然产能递减快、油藏整体采收率低等问题,难动用储量比例较大。以钻井平台为载体,中海石油首次对渤中 25-1 油田沙三段 2 口套管完井的水平井采用多级封隔器分段压裂技术开展大型加砂压裂先导性试验。分析了海上水平井大型加砂压裂施工作业难点与对策,通过压裂参数优化设计,使用哈里伯顿完井分段压裂工具分别对 2 口水平井成功完成了 3~5 段的加砂压裂改造。压后投产初期采用 6 mm 油嘴放喷排液,日产油分别为 71.5 m³ 和 92.8 m³,增产倍比是同区域邻井直井的 5~8 倍,压裂增产效果明显。渤中 25-1 油田水平井分段加砂压裂的成功,为海上低渗透储层高效开发提供了可靠的技术保证,也为海上同类型油气藏勘探与开发提供经验。

关键词 渤中 25-1 油田;低渗透储层;钻井平台;水平井;分段压裂;套管完井**中图分类号**:TE357 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.03.009

Pilot test of horizontal well staged fracturing for low permeability reservoirs in BZ25-1 oilfield

LIU Peng, XU Jie, XU Gang, CHEN Yi, HAN Yaotu

Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China

Abstract: BZ25-1 is a typical offshore low permeable oilfield with the characteristic of density lithology, buried depth, abnormally high temperature and high pressure, poor reservoir quality, small layers of large span, fast production decline of single well, low recovery factor and other issues, and difficult to produce reserves by a large proportion. Horizontal well staged fracturing is an important method to increase single well production in low permeability reservoirs. Self-elevating drilling platform as a carrier, the large-scale sand fracturing field test of two casing completion wells was conducted in the E_{2s3} reservoir of BZ25-1 oilfield through horizontal multistage packer staged fracturing technology for the first time in domestic offshore. Offshore construction difficulties and technical countermeasures were analyzed, the optimization of completion string and fracturing parameters were carried out. Fracturing fluid was flew back to the hole through Ø6mm choke after fracturing, the daily oil flow rate was 71.5 m³ and 92.8 m³, the yield ratio has reached 5~8 times of vertical well in the same areas. The post-fracturing production of two horizontal wells is obvious. The successful practice of horizontal well staged fracturing in BZ25-1 oilfield offered dependable technique for exploiting offshore low permeable reservoir, and valuable experience was provided for offshore exploration and development of the same reservoir.

Keywords: BZ25-1 oilfield; low-permeability reservoir; drilling platform; horizontal well; staged fracturing; casing completion

渤中 25-1 油田位于渤海湾盆地下第三系背斜构造,该油田自 2005 年 2 月投入开发以来,由于主力含油层段沙河街组储层渗透率非常低^[1],井间连通性很差,单井自然产能低,储层基本处于原始状态。前期定向井开发实践表明,经压裂后定向井表现出单井产量递减快,稳产期短、采出程度低的特

点。水平井分段压裂改造能够增加油气藏泄油面积,提高油藏产量和采油速度,是实现低渗透油气藏高效开发的关键技术^[2-3]。但海上压裂施工条件受限,目前已压裂油气井均为单井单层压裂^[4],规模小,要实现海上水平井大规模压裂尚无经验可借鉴。

海上压裂施工场地条件受限^[5-6],因受季节因素影响,海况复杂多变,同时兼顾作业安全、环保等风险,海上大型压裂施工难点主要包括以下几个方面:(1)压裂平台上放置重型设备对海上平台的稳定性与安全性造成了负担。何懋华等^[7]针对南海海域环境荷载下服役的固定式平台,计算平台无缺陷和损伤 2 种情况下的极限承载能力;赵战江等^[8]对东海某压裂平台的作业甲板承重能力进行校核,对甲板上的关键部位进行承载能力分析和优化设计。(2)水平井多段压裂改造规模大,常规的将压裂设备、材料与工具等放置在压裂船或三用工作船上的传统海上压裂施工方式适应性差^[9]、安全风险更高。郭少儒等^[10]开展了海上低渗油气藏平台压裂工艺研究与实践,形成了完善的海上低渗油气藏平台压裂作业配套技术。(3)与陆地油田相比,海上大型加砂压裂地面连续供液、供砂施工配套工艺保障难度更大。(4)渤中 25-1 油田生产井采用 244.5 mm 套管整体固井,质量较好,139.7 mm 尾管固井质量整体较差,最后一级压裂时压力窜至 244.5 mm 套管内风险相对较大。(5)目的储层非

均质性强,层薄跨度大,岩性致密且破裂压力高,增加了压开地层造长缝难度。

为此,以中油海 16 号自升式钻井平台为作业载体,国内海上首次运用水平井套管内多级封隔器分段压裂技术开展大型加砂压裂先导性试验,并取得了成功,为海上低渗储层的有效开采奠定了基础。

1 基本情况

为充分认识、了解这 2 口水平井的具体情况,简单介绍储层的工程地质特征。从海上实际条件出发,针对海上大型压裂施工作业难点,采取了相应的技术对策。

1.1 地质特征

XC7H 井和 XC8H 井是采用套管完井的两口水平井,目的层位沙三段,埋深 3 672~3 819 m,物性差,非均质性强,天然裂缝发育,岩性致密,储层主要为灰色-灰白色含砾砂岩与灰褐色-深灰色泥岩不等厚互层,碎屑骨架颗粒组分较稳定,以石英、长石为主,胶结物成分主要为方解石和白云石。2 口水平井的基本情况见表 1。

表 1 水平井基本情况
Table 1 General information of horizontal wells

井号	目的层位	完钻井深/m	水平段长/m	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	孔隙度/%	完井方式	水平段固井质量
XC7H	沙三段	4 688	468	0.80~5.50	10.1~15.7	Ø244.5 mm 套管悬挂	差
XC8H		4 735	400	0.17~3.90	10.1~15.7	Ø139.7 mm 尾管固井完井	差

从表 1 可以看出,2 口水平井平均孔隙度为 13.5%,平均渗透率为 2.7×10⁻³ μm²,排驱压力和饱和度中值压力都较高,孔喉半径小(1.2~2.0 μm),属于中孔低渗储层,油藏地温梯度 3.81 ℃/100 m,压力梯度 1.56 MPa/100 m,属于异常高温高压系统^[11]。

1.2 海上大型压裂施工对策

根据海上大型压裂施工的难点,制定的解决措施如下:(1)打破常规海上压裂施工方式(压裂船或拖轮),以自升式钻井平台为施工的载体,整合自升式钻井平台上设备设施、空间资源,压前合理优化好压裂设备布置与流程联接设计。(2)钻井平台压裂采取非连续施工,保证供液、供砂都能跟上。(3)压裂管柱均增加了 244.5 mm 悬挂封隔器且井口套管阀处安装双安全限压阀(限压 13 MPa),管控风险。(4)采用支撑剂段塞工艺、大排量施工提高压裂效果。

2 完井管柱配套与压裂设计

从首次试验的角度出发,选择了哈里伯顿公司

的水平井完井分段压裂工具,同时根据储层特点对压裂入井材料(压裂液、支撑剂)和施工参数进行了优选,以确保施工顺利。

2.1 分段压裂工具及管柱结构

该压裂投产一次性完井压裂管柱可实现多层分段压裂,不需要压井投产^[12]。管柱结构主要包括球座总成、压差滑套、管内封隔器、投球滑套和悬挂封隔器。压裂管柱入井后,投泡沫球^[13]入球座总成,坐封管内封隔器,并打开底部压差滑套,然后进行压裂施工;随后逐级投可溶金属球依次打开投球滑套对其它目的层压裂,压后放喷试生产不动管柱,实现一趟管柱完成 3 至 5 段压裂^[14],高效快捷。后期压裂管柱可实现丢手,过提提出棘齿密封,更换为生产/注水管柱,这一趟管柱实现了压裂生产一体化,具有节省工期,工艺成熟,工具可靠性高的优点^[15]。水平井分段压裂主要工具性能参数见表 2。

2.2 压裂入井材料

渤中 25-1 沙三段储层泥质含量相对较高,按

照压裂液低伤害、易返排的要求^[16],压裂采用了耐高温羧甲基瓜胶络合交联压裂液体系,其配方为:0.53%HPG+0.30%防膨剂+0.30%助排剂+0.10%杀菌剂+0.33%调理剂+0.53%延迟交联剂+胶囊破胶剂+过硫酸铵。该配方表面张力低(21.96 mN/m),

防膨率高(大于 76%),破胶彻底(小于 5 mPa·s),抗温抗剪切性能好,现场取样压裂液在温度 145 ℃、剪切速率 170 s⁻¹条件下剪切 120 min 后,黏度保持在 140 mPa·s 以上,完全满足携砂要求^[17]。地层闭合压力是压裂支撑剂选择的一个重要参数^[18]。

表 2 分段压裂工具技术参数
Table 2 Technical parameters of multistage fracturing tools

工具名称	规格尺寸/mm	长度/m	外径/mm	内径/mm	耐温/℃	承受压差/MPa
悬挂封隔器	244.5	1.990	206.38	74.910	177.0	69.0
隔离封隔器	139.7	2.110	116.66	71.888	177.0	64.1
投球滑套	76.0	0.830	100.33	60.960	176.7	—
压差滑套	88.9	1.100	114.30	—	176.7	—
坐封球座	88.9	0.604	114.30	—	176.7	—
水力锚	88.9	0.800	210.00	76.000	150.0	70.0

从图 1 渤中 25-1 油田前期已实施定向井小型测试压裂分析数据可知,沙三段储层闭合压力 70~76 MPa。地层闭合压力高,不同粒径陶粒的导流能力差距变小^[19],为提高裂缝导流能力有必要实现高砂比,而高砂比施工增加了砂堵风险^[20],因此使用低密度陶粒。考虑支撑剂进入裂缝准则:平均动态缝宽至少为 3 倍平均支撑剂直径^[21]。故选定低密(体积密度 1.49 g/cm³)20/40 目在压力 69 MPa 下破碎率小于 7%的高强度陶粒作为压裂支撑剂,保证支撑剂能顺利进入地层,达到所需要的砂量。

2.3 施工参数优选

根据测井解释以及小层划分,XC7H 井分 5 段射孔,XC8H 分 3 段。2 口井射孔均采用多级压力起爆点火方式,中间夹层段用 Ø73.0 mm 外加厚油管连接,实现一次加压完成全部射孔作业施工,节省作业环节,降低断爆的风险。针对储层埋藏深所导致的高破裂压力,采用常规聚能射孔工艺,选择大直径射孔枪及深穿透射孔弹,提高穿深能力,降低破裂压力,孔密采用 16 孔/m,以避免因弹间干扰而降低孔深。采用 60°相位,有效降低弯曲摩阻从而降低施工泵压^[22]。

采用压裂软件 FracproPT 进行压裂施工参数优化,在每口井正式压裂前进行小型测试压裂,根据测试压裂结果来确定、调整正式压裂施工参数^[23]。借鉴该油田前期已措施井的压裂经验,选择了较为稳妥的压裂泵注程序,设计 XC7H、XC8H 井加砂规模分别为 166.4 m³ 和 79.1 m³,各井段设计压裂施工参数见表 3。从表 3 可以看出,XC7H 井和 XC8H 井的前置液比例约为 50%,施工排量为 3.5~4.0 m³/min 和 3.5~4.5 m³/min,砂量约为 30 m³,平均砂比均为 20%。

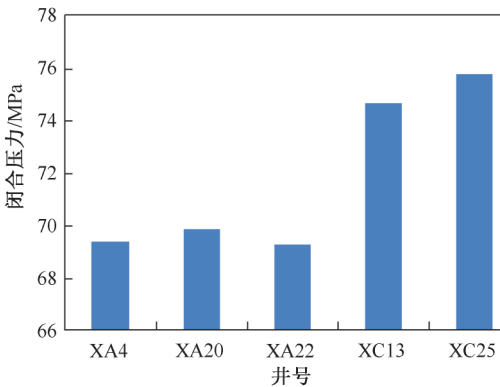


图 1 5 口已压裂井的测试压裂分析数据
Fig.1 Mini frac analysis data for 5 fractured wells

表 3 设计压裂施工参数
Table 3 Designed fracturing parameters

压裂级序	井号	射孔井段/m	前置液比例/%	施工排量/(m ³ ·min ⁻¹)	砂量/m ³	平均砂比/%
第一段	XC7H	4 590~4 593	51.6	3.5~4.0	30.7	20
第二段		4 497~4 500	51.5	3.5~4.5	35.2	20
第三段		4 361~4 364	51.5	3.5~4.5	35.2	20
第四段		4 260~4 263	51.4	3.5~4.5	35.2	20
第五段		4 147~4 150	51.6	3.5~4.0	30.1	20
第一段	XC8H	4 660~4 663	51.1	3.5~4.0	25.3	20
第二段		4 547~4 550	51.3	3.5~4.0	28.5	20
第三段		4 422~4 425	51.2	3.5~4.0	25.3	20

3 现场试验及效果分析

2016 年 12 月 8 日至 19 日先后对 XC8H 井、XC7H 井 2 口水平井采用 88.9 mm+73.0 mm 的 3Cr-P110 外加厚油管分别注入线性胶和冻胶进行小型测试压裂作业和主压裂施工作业。

3.1 测试压裂分析

运用 FracproPT 压裂分析软件对停泵后的压

降曲线进行拟合分析,结果见表 4。根据分析结果,决定调整主压裂施工排量 3.0~3.5 m³/min 低于原设计值;施工压力高,加砂困难,降低了原设计高砂比,提高了平均砂比;地层滤失系数正常,在每级前置液中去掉 2 个砂段塞,个别井段去掉预前置液线性胶及线性胶砂段塞;压裂液效率高,地层渗透率低,调整前置液用量,前置比从 51%降至 44%左右。

表 4 XC8H 井、XC7H 井小型测试压裂分析数据
Table 4 Mini frac analysis data for wells of XC8H and XC7H

井号	停泵压力 /MPa	闭合压力 /MPa	闭合压力梯度 /(MPa·m ⁻¹)	闭合时间 /min	液体效率 /%	近井摩阻 /MPa	净压力 /MPa	滤失系数 /(10 ⁻⁴ ·min ^{-1/2})
XC8H	78.5	71.56	0.0188	35.10	67.3	2.4	6~7	6.09
XC7H	80.3	73.43	0.0196	37.23	70.1	2.6	6~7	5.30

3.2 分段压裂施工

压裂采用油管非连续 8 段注入,历时 8 d,XC7H 井分 5 段进行压裂,共成功完成 162.95 m³ 支撑剂、1 831.33 m³ 压裂液的注入,施工压力 56.6~71.5 MPa,排量 3.0~3.8 m³/min。XC8H 井分 3 段共完

成 89.8 m³ 支撑剂 1 005.8 m³ 压裂液的注入,施工压力 61.2~68.2 MPa,排量 3.1~3.5 m³/min。两口井现场试验情况见表 5。由表 5 可知,两口井的前置液比例略低于设计值,而加砂量、平均砂比和施工排量均达到压裂施工设计要求,压裂工艺实施成功。

表 5 现场试验情况统计表
Table 5 Statistical list of field tests

井号	压裂级序	入地液量/m ³	前置液比例/%	加砂量/m ³	平均砂比/%	施工排量/(m ³ ·min ⁻¹)	施工泵压/MPa
XC7H	第一段	337.9	44.5	31.50	20.4	2.8~3.0	63.0~71.5
	第二段	378.7	44.0	28.75	16.7	3.0	63.1~69.0
	第三段	403.5	41.7	35.75	18.6	3.5	63.3~68.8
	第四段	381.1	42.0	35.65	20.7	3.5	61.0~66.0
	第五段	349.8	42.9	31.30	22.7	3.5~3.8	57.0~65.0
XC8H	第一段	336.3	44.0	28.50	22.5	3.0~3.5	66.0~71.5
	第二段	349.4	42.9	32.10	22.5	3.3~3.5	62.5~67.5
	第三段	320.1	43.7	29.20	22.5	3.1~3.3	61.2~68.0

3.3 压后效果分析

XC7H 井、XC8H 井压后分别于 12 月 18 日和 20 日采用 6 mm 可调油嘴自喷投产。投产初期,XC7H 井在油压 7.1 MPa 时日产油 71.5 m³,XC8H 井在油压 10 MPa 时日产油 92.8 m³,与同构造同层位邻井 XC5 直井测试产能相比,增产倍比分别达到了 5 倍和 8 倍,如图 2 所示。从图 2 可以看出,两口试验井压裂均有明显的增产效果,XC8H 井增产效果较 XC7H 井好,XC7H 井增产倍数略低。

目前,2 口水平井压后放喷生产情况如图 3 所示。XC8H 井单井产能达到配产,与钻前认识一致,XC7H 井产能略差。XC7H 井压 5 条缝,共泵入液量 1 831.3 m³,返排出 177 m³;XC8H 压 3 条缝,共泵入液量 1 005.8 m³,返排出 119 m³。

冬季气候低,XC7H 井泵入大量压裂液导致地

层温度骤降,储层可能出现析蜡现象,增加了压裂液的返排难度。XC7H 压裂液返排率低,可能造成羟丙基瓜尔胶压裂液破胶后残渣堵塞沙三段储层孔喉影响该井的初期产能。

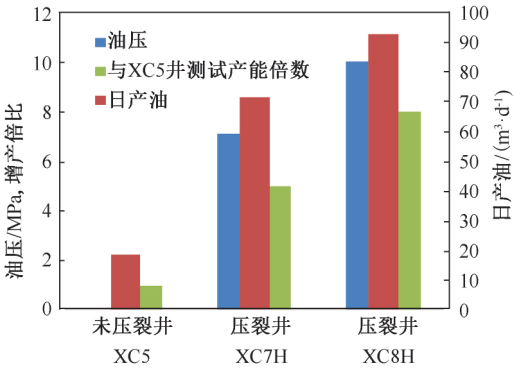


图 2 两口水平井压裂先导性试验效果分析
Fig.2 pilot test results for two horizontal wells after fracturing

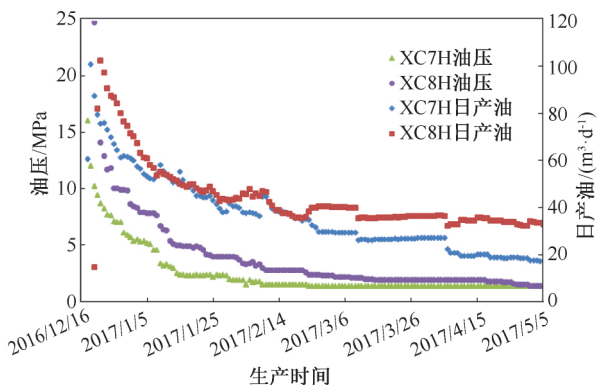


图3 两口水平井压后放喷实际生产情况
Fig.3 The actual production conditions of two horizontal wells after fracturing

4 结论

(1) 针对储层特点和海上压裂的难点,通过发挥钻井平台施工能力以及配套海上压裂工艺,顺利实施了2口水平套管井的分段压裂,投产后增产效果明显,为海上低渗透难动用储量的经济高效开采提供了成功的经验。

(2) 水平井完井分段压裂工具性能可靠,一趟管柱实现了水平段选择性分段压裂与投产一体化,明显节省工期,因此保证工具入井顺畅到位至关重要。

(3) 后续海上压裂施工建议在液体性能稳定的前提下实现压裂液连续混配和压后及时返排,以提高海上压裂时效和减少储层中压裂液滞留造成的伤害。

致谢:本文在撰写和数据的获取过程中得到了单位部门领导和同事的大力支持,在此表示由衷的感谢。

参 考 文 献

- [1] 孙海涛,李超,钟大康,等. 渤中25-1油田沙三段低渗透储层特征及其成因[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(3): 11-16.
SUN Haitao, LI Chao, ZHONG Dakang *et al.* Characteristics and origin of low permeability reservoir of the third member of Shahejie Formation in Bozhong 25-1 oilfield [J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26(3): 11-16.
- [2] 欧阳伟平. 致密气藏分段压裂水平井的不稳定压力与产量综合分析方法[J]. 油气井测试, 2018, 27(1): 14-21.
OUYANG Weiping. Comprehensive analysis method for transient pressure and production of multistage fractured horizontal well in tight gas reservoirs [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 14-21.
- [3] 周小林,高志华,张冲. 龙凤山气田大通径免钻桥塞分段压裂先导试验[J]. 油气井测试, 2018, 27(1): 62-67.

ZHOU Xiaolin, GAO Zhihua, ZHANG Chong. Pilot tests of staged fracturing involving large diameter drill free bridge plugs in the Longfengshan gas field [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 62-67.

- [4] 李蕴哲,任泽,王永刚. 小型压裂测试在海上探井压裂的应用与分析[J]. 油气井测试, 2017, 26(5): 53-59.
LI Yunzhe, REN Ze, WANG Yonggang. Application and analysis of minifrac test in offshore exploratory well [J]. Well Testing, 2017, 26(5): 53-59.
- [5] 郭士生,赵战江,聂锴,等. 海上平台射孔、压裂、测试与水力泵快速返排求产联作测试工艺技术研究与应用[J]. 油气井测试, 2015, 24(1): 41-43.
GUO Shisheng, ZHAO Zhanjiang, NIE Kai *et al.* Technology research and application of combination technology of perforation, fracturing, testing, hydraulic jet pump fast reverse flushing and testing on offshore platform [J]. Well Testing, 2015, 24(1): 41-43.
- [6] 徐文江,肖茂林,孙兴旺,等. 海上低渗透油田水平井多级压裂先导试验[J]. 中国海上油气, 2017, 29(6): 108-114.
XU Wenjiang, XIAO Maolin, SUN Xingwang *et al.* Pilot test of multi-stage fracturing technology for horizontal wells in offshore low permeability reservoirs [J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(6): 108-114.
- [7] 何懋华,孙树民. 南海固定式平台极限承载能力分析[J]. 船海工程, 2013, 42(5): 161-165.
HE Maohua, SUN Shumin. Analysis on ultimate bearing capacity of fixed platforms at South China Sea [J]. Ship & Ocean Engineering, 2013, 42(5): 161-165.
- [8] 赵战江,张超. 海上平台压裂作业承载能力校核[J]. 中国海洋平台, 2017, 32(5): 41-48, 54.
ZHAO Zhanjiang, ZHANG Chao. Check on bearing capacity of fracturing operation in offshore platform [J]. China Offshore Platform, 2017, 32(5): 41-48, 54.
- [9] 徐文江,谭先红,余焱冰,等. 海上低渗透油田开发基本矛盾和主控因素研究[J]. 石油科技论坛, 2013, 32(5): 12-16.
XU Wenjiang, TAN Xianhong, YU Yanbing *et al.* Study of basic contradictions and main controlling factors of offshore low-permeability oilfield development [J]. Oil Forum, 2013, 32(5): 12-16.
- [10] 郭布民,王杏尊,鲍文辉,等. 西湖凹陷探井压裂实践与认识[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(S0): 70-72.
GUO Bumin, WANG Xingzun, BAO Wenhui *et al.* Practice and knowledge of exploration well fracturing in West Lake sag [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(S0): 70-72.
- [11] 黄凯,杨喆,胡勇,等. 渤海湾盆地渤中凹陷25-1油田沙三段近岸水下扇沉积特征[J]. 东北石油大学学报, 2017, 41(4): 32-42.
HUANG Kai, YANG Zhe, HU Yong *et al.* Sedimentary characteristics of nearshore subaqueous fan of the third

- member of Shahejie formation in Bozhong sag 25-1 oilfield of Bohaiwan basin [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2017, 41(4):32-42.
- [12] 滕小兰. 水平井分段压裂技术在ZJ气田的研究与应用[J]. 石油地质与工程, 2014, 28(5):123-125.
TENG Xiaolan. The research and application of horizontal well staged fracturing technique in ZJ gas-field [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2014, 28(5):123-125.
- [13] 苏红涛, 徐深X井完井井控风险分析与认识[J]. 西部探矿工程, 2017, 29(7):65-67, 69.
SU Hongtao. Well control risk analysis and cognition of completion for well Xushen X [J]. West-China Exploration Engineering, 2017, 29(7):65-67, 69.
- [14] 董建华, 郭宁, 孙渤, 等. 水平井分段压裂技术在低渗透油田开发中的应用[J]. 特种油气藏, 2011, 18(5):117-119.
DONG Jianhua, GUO Ning, SUN Bo *et al.* Application of horizontal well multistage fracturing in low permeability oilfield development [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(5):117-119.
- [15] 唐勇, 王国勇, 李志龙, 等. 苏53区块裸眼水平井段内多裂缝体积压裂实践与认识[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(1):63-67.
TANG Yong, WANG Guoyong, LI Zhilong *et al.* Practice and understanding on multiple crack volume fracturing in open hole horizontal well section of Zone Su53 [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(1):63-67.
- [16] 曾雨辰, 陈波, 杜爱龙, 等. 白庙平1水平井多级分段重复压裂实践[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(6):79-82.
ZENG Yuchen, CHEN Bo, DU Ailong *et al.* Horizontal well multistage refracturing practice in well Baimiao-H1 [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(6):79-82.
- [17] 李雷, 徐兵威, 何青, 等. 致密砂岩气藏水平井多簇分段压裂工艺[J]. 断块油气田, 2014, 21(3):398-400.
LI Lei, XU Bingwei, HE Qing *et al.* Multi-cluster staged fracturing technology for horizontal well in tight sandstone gas reservoirs [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(3):398-400.
- [18] 何青, 秦玉英, 姚昌宇, 等. 鄂尔多斯盆地南部致密油藏水平井分段压裂技术[J]. 断块油气田, 2014, 21(6):816-818.
HE Qing, QIN Yuying, YAO Changyu *et al.* Staged fracturing technology of horizontal well for tight oil reservoir in south Ordos Basin [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(6):816-818.
- [19] 曹学军. 川西致密储层水平井分段压裂工艺技术[J]. 钻采工艺, 2015, 38(1):58-61.
CAO Xuejun. Staged fracturing technologies of horizontal well in Chuanxi tight reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(1):58-61.
- [20] 任山, 刁素, 颜晋川, 等. 大型加砂压裂在川西难动用储层Js21的先导性试验[J]. 钻采工艺, 2007, 30(4):64-66.
REN Shan, DIAO Su, YAN Jinchuan *et al.* Pilot test of massive sand fracturing in Js21 layer in the west Sichuan [J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(4):64-66.
- [21] 张晖, 龚杨, 黄龙藏, 等. 塔中志留系改性黄原胶加砂压裂研究与应用[J]. 钻采工艺, 2016, 39(4):45-48.
ZHANG Hui, GONG Yang, HUANG Longzhang *et al.* Research and application of modified xanthan gum fracturing technology in Tazhong Silurian reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2015, 39(4):45-48.
- [22] 陈付虎, 张士诚, 郑锋辉, 等. 大牛地气田盒1段气藏水平井分段压裂工艺研究与实践[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(9):125-127.
CHEN Fuhu, ZHANG Shicheng, ZHENG Fenghui *et al.* Research and application for stepwise fracturing technique of horizontal wells in He1 formation of Daniudi gas-field [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(9):125-127.
- [21] 陈作, 何青, 王宝峰, 等. 大牛地气田长水平段水平井分段压裂优化设计技术[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(6):82-85.
CHEN Zuo, HE Qing, WANG Baofeng *et al.* Design optimization of staged fracturing for long lateral horizontal wells in Danindi gas field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(6):82-85.

编辑 许兰婷

第一作者简介:刘鹏,男,1988年出生,助理工程师,2015年毕业于西南石油大学油气田开发工程专业,现从事海上油田井下作业技术研究与应。电话:022-66501136;E-mail:liupeng50@cnooc.com.cn。地址:天津市滨海新区海川路2121号渤海石油管理局大厦B座,邮政编码:300459。