

海上中低渗储层水力喷射压裂技术

王绪性,冯青,李湾湾,郭布民,袁文奎

中海油田服务股份有限公司油田生产研究院 天津 300450

通讯作者:Email:wangxuxing1988@163.com

项目支持:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”子课题“深层高温压裂液及配套技术”(2016ZX05027-003-004)

引用:王绪性,冯青,李湾湾,等.海上中低渗储层水力喷射压裂技术[J].油气井测试,2021,30(1):46-51.

Cite: WANG Xuxing, FENG Qing, LI Wanwan, et al. Hydraulic jet fracturing technology for offshore medium and low permeability reservoirs [J]. Well Testing, 2021, 30(1): 46-51.

摘要 为推进水力喷射压裂技术在海上油田的广泛应用,实现油气田的高效开发,取得经济和技术上的双赢,对水力喷射压裂设计流程、喷嘴参数优选、施工排量确定、地面压力预测、海水基压裂液性能评价及施工管柱优选等研究,结合海上中低渗储层特点,探索出油管加砂压裂、油套环空补液兼备的水力喷射压裂工艺技术。海上某油田BH-1井作业后60 d内,最高产油量 $99.8\text{ m}^3/\text{d}$,平均产油 $77.0\text{ m}^3/\text{d}$,达到预期效果,比常规先射孔再压裂工艺施工节约40 h。该工艺技术在海上作业高效可行,为后续高效开发海上中低渗储层提供了可靠技术借鉴。

关键词 海上油田;储层改造;水力喷射;压裂;中低渗储层;效果评价

中图分类号:TE337 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.01.009

Hydraulic jet fracturing technology for offshore medium and low permeability reservoirs

WANG Xuxing, FENG Qing, LI Wanwan, GUO Bumin, YUAN Wenkui

Production Optimization R & D Institute of China Oilfield Services Limited, Tianjin 300450, China

Abstract: In order to promote the wide application of hydraulic jet fracturing technology in offshore oilfields, realize the efficient development of oil and gas fields, and achieve a win-win situation in economy and technology, the hydraulic jet fracturing design process, nozzle parameter optimization, construction displacement determination, surface pressure prediction, seawater-base fracturing fluid performance evaluation and construction string optimization are studied. Combined with the characteristics of offshore low and medium permeability reservoirs, the hydraulic jet fracturing technology with both sand fracturing and casing annulus fluid replenishment is formed. Within 60 days after the operation of Well BH-1 in an offshore oilfield, the maximum oil production is $99.8\text{ m}^3/\text{d}$ and the average oil production is $77.0\text{ m}^3/\text{d}$, which achieves the expected effect and saves 40 hours compared with the conventional perforation and fracturing process. This technology is efficient and feasible for offshore operation and provides reliable technical reference for the subsequent efficient development of low permeability offshore reservoirs.

Keywords: offshore oilfield; reservoir reformation; hydraulic jet; fracturing; medium and low permeability reservoir; effect evaluation

在油气田勘探开发过程中,水力压裂技术作为一项重要的配套技术,在保持油气田稳产增产上发挥了重要作用^[1]。二十世纪80年代初,海上油气田水力压裂主要用于浅层油井解堵,并开展了一些尝试性水力压裂。到二十一世纪初,水力压裂成为海上低渗透油气藏增产改造的重要方式^[2-3],同时还应用于注水井等辅助井中^[4-5]。目前,海上水力压裂应用领域更加多元化,从低渗油气藏发展到特低渗和中高渗油气藏,在欧洲北海、墨西哥湾、巴西、东南亚海域的油气田中广泛应用,特别是北海油田^[6-7]。国外诸多海域的低渗透油气田已成功应用压裂工艺,实现了油气

田的高效开发,取得了经济和技术上的双赢。2003年,巴西深水近海油田首次应用水力喷射压裂技术并取得成功^[8],随后该技术在全球其他油田得以推广和应用^[9-11]。国内学者对水力喷射压裂技术进行理论研究、工具研制及改进^[12-14],并在陆地油田进行了先导试验、规模应用,并用于一些复杂情况井^[15-18]。但是,国内海上油田尚未开展规模应用。

本文研究水力喷射压裂工艺设计流程及工艺参数优化,同时以海上一口低渗储层油井为例,探索油管加砂压裂、环空补液水力喷射压裂工艺,旨在为后续高效开发海上低渗储层提供技术借鉴。

1 水力喷射压裂工艺

水力喷射压裂是集射孔、压裂和隔离于一体的增产措施,其技术原理是通过油管把水力喷射井下装置下到指定层位位置,地面流体加压,通过井下喷嘴形成高速磨料射流,实现水力喷砂射孔,最终形成具有一定直径和深度的孔眼,然后关闭油套环空,套管注入并保持油套环空压力略低于地层破裂压力,高速射流在喷嘴周围能够产生低压区域,促使套管环空注入的液体只流进该区域,两股液体混合并进入水力喷射压裂位置^[19]。继续喷射,根据伯努利方程,孔眼顶部的滞止力大于裂缝起裂压力时,裂缝将会顺利起裂扩展。因此,裂缝将仅在水力喷射形成的孔眼里起裂、扩展,但在其他位置由于环空压裂液压力低于地层起裂压力而不再开裂。水力喷射压裂由射流产生裂缝,环空压力+射流增压使裂缝延伸;能精确预测裂缝位置,并确定裂缝初始方向;采用水力封隔,且一次多段。与常规水力压裂相比,具有明显优势。

水力喷射压裂主要技术参数包含喷嘴参数、施工排量、地面压力预测和压裂工艺优化等。

1.1 喷嘴参数优选

合理选择喷嘴直径和喷嘴个数是前提条件。如果选择小直径、个数少的喷嘴组合,那么施工排量将受限制;如果选择喷嘴小直径、个数多的喷嘴组合,那么水力喷射压裂工具成本将会剧增;如果选择大直径、个数多的喷嘴组合,那么对地面泵功率要求较高。因此,需要综合考虑施工排量的要求,加砂和喷嘴耐磨性等因素才能最终确定喷嘴直径及个数。实践证明,保持射流速度在 200~250 m/s 才能达到良好的射孔效果。不同喷嘴参数下,排量与喷射速度关系如图 1 所示。

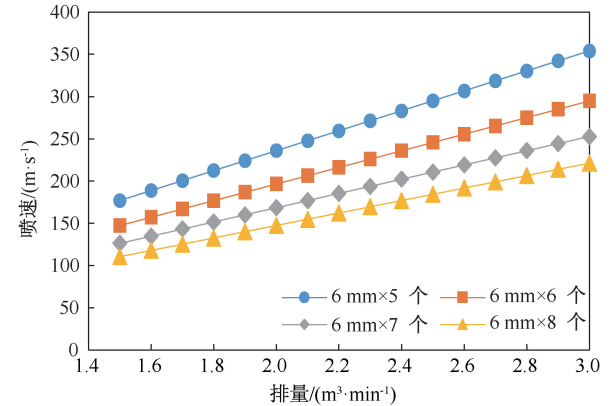


图 1 排量与喷嘴喷速关系曲线
Fig. 1 Relation curve of displacement and nozzle velocity

1.2 施工排量优化

水力喷射压裂涉及两套泵注系统,分别为油管泵注和油套环空泵注,其中油管泵注携砂液,油套环空泵注压裂液基液。

1.2.1 油管排量

在同一喷嘴直径下,喷嘴压降与喷嘴的排量成正比,也就是说,同一直径的喷嘴要产生比较大的喷嘴压降,则需要较大的作业排量。相同作业排量下,选择喷嘴的数量多,则产生的喷嘴压降小。油管排量和喷嘴压降的关系为

$$Q = \left(\frac{p_b C^2 A^2}{513.559 \rho} \right)^{0.5} \tag{1}$$

式中: p_b 为压降,MPa; Q 为排量,L/s; ρ 为流体密度,g/cm³;A 为喷嘴总面积,mm²;C 为喷嘴流量系数(一般取值 0.9)。

喷嘴压降一般保持在 30 MPa 就可以保证压裂的成功^[20]。根据(1)式,可计算施工所需的最小油管排量。不同喷嘴参数下,排量与喷嘴压降关系如图 2 所示。

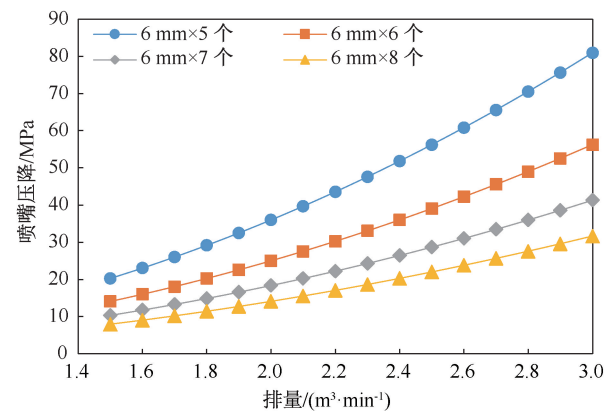


图 2 排量与喷嘴压降关系曲线
Fig. 2 Relation curve of displacement and nozzle pressure drop

根据水力喷射压裂过程中喷嘴磨损分析^[21-22],同时结合现场施工经验,不同套管或井眼尺寸对应工具尺寸、喷嘴尺寸和喷嘴个数见表 1。

表 1 不同套管尺寸下推荐使用的喷嘴参数
Table 1 Recommended nozzle parameters for different casing sizes

套管尺寸/mm	工具外径/mm	喷嘴尺寸/mm	喷嘴数量
114.3	77.72	4.76	5 或 6
139.7	95.25	6.35	7 或 8
177.8	114.30	6.35	8 或 9
244.5	146.05	7.94	9 或 10

1.2.2 油套环空排量

油套环空排量用来补偿地层漏失和裂缝扩

展,控制油套环空排量,保持合适环空压力至为重要。在喷砂射孔阶段,需要尽可能减小围压。这样,可以减小对射流的束缚,提高喷嘴喷射出流体的破岩能力,获得较理想的射孔孔眼。所以,喷砂射孔阶段油套环空敞开。而加砂压裂阶段,应尽量提高油套环空围压。这样,可以在射孔孔眼中获得较高的静压力,有利于压破地层,维持裂缝的扩展。同时,控制油套环空压力应小于裂缝延伸压力,从而保证压裂液仅在喷砂射孔孔眼进入地层。

1.3 地面压力预测

水力喷砂射孔阶段,开启油套环空,通过注入射孔液,射孔液经喷射工具喷出射入地层形成孔眼,随后射孔液从孔眼流出,经油套环空返回地面,地面油压可由下式表示,即

$$p_{\text{tubing}} = p_b + p_{\text{ftubing}} + p_{\text{fannulus}} \tag{2}$$

式中: p_{tubing} 为地面油管压力,MPa; p_b 为喷射工具喷嘴压降,MPa; p_{ftubing} 为油管压裂液摩阻,MPa; p_{fannulus} 为环空压裂液摩阻,MPa。

水力喷射压裂阶段,地面油管压力和环空压力分别由下式计算,即

$$p_{\text{tubing}} = C_a p_{\text{annulus}} + p_b + p_{\text{ftubing}} - p_{\text{fannulus}} \tag{3}$$

$$p_{\text{annulus}} = p_{\text{fac}} + p_{\text{ftubing}} - p_h - p_{\text{boost}} \tag{4}$$

式中: p_{annulus} 为地面环空压力,MPa; p_h 为静液柱压力,MPa; p_{boost} 为射孔孔眼内增压值,MPa; p_{fac} 为地层破裂压力,MPa; p_b 为喷射工具喷嘴压降,MPa; C_a 为地面油管压力修正系数(取值 0.4~0.6)。

现场试验发现,当环空注液时,地面油压的增量并不等于地面套压值,而是只增加地面套压的 40%~60%。因此,在公式中引入修正系数,确保准确预测水力喷射压裂阶段的地面油压^[12]。

1.4 压裂工艺优化

水力喷射压裂工艺主要包括射孔砂、支撑剂粒径优选、压裂液性能评价及施工管柱优选。

1.4.1 射孔砂及支撑剂优选

射孔砂的作用是通过高速流体携带,冲击并射穿套管壁和水泥环。因此,需要选择非球形有棱角的石英砂作为射孔砂。压裂支撑剂优选原则应考虑储层闭合应力大小和裂缝闭合后导流能力。所以,选择大粒径、抗压能力强的支撑剂先携带到地层中稳定下来,有利于以后砂桥的稳定。如果地层闭合压力比较大,可考虑 1:1 混合两种有一定粒径差别的支撑剂,增加支撑剂的抗压性能。

1.4.2 压裂液优选

压裂液的优选需结合地层温度、与地层液体配伍性、对产能的影响及液体成本等多方面因素综合考虑,而用于水力喷射的压裂液,除了考虑上述方面外,理想的水力喷射压裂液至少需要满足以下条件:①稳定的流变性;②高剪切流速下的自愈能力;③对喷嘴的保护;④尽可能降低施工摩阻;⑤良好的地层渗透率恢复;⑥最小化对裂缝导流能力的伤害。结合海上施工特点,选用海水基压裂液体系。压裂液携砂情况如图 3 所示,其基液黏度、耐高温剪切情况,以及破胶性能等指标见表 2。



图 3 压裂液携砂性能

Fig. 3 Sand-carrying performance of fracturing fluid

表 2 压裂液性能指标

Table 2 Performance indicators of fracturing fluid		
项目	行业指标	检测结果
基液黏度(60~120℃)/(mPa·s)	20~80	45
交联时间/s	30~120	65
黏度/(mPa·s)	≥50	131(80℃)
破胶时间/min	≤720	60~300
破胶液黏度/(mPa·s)	≤5.0	3.0
破胶液与煤油界面张力/(mN·m ⁻¹)	≤2	1
岩石基质渗透率损害率/%	≤30	20
残渣含量/(mg·L ⁻¹)	≤600	200
破乳率/%	≥95	96
压裂液滤液与地层水配伍性	无絮凝,无沉淀	无絮凝,无沉淀

1.4.3 压裂管柱优选

水力喷射压裂分为常规管柱拖动、连续油管拖动和不动管柱,每种管柱的优缺点见表 3。

采用环空加砂的连续油管拖动不适合于生产套管悬挂在技术套管中的井,而海上井身结构都是生产套管挂在技术套管中,所以连续油管拖动环空加砂管柱工具不适合海上压裂施工。若压裂段数

小于 3 段,可采用常规管柱拖动工具或不动管柱投球滑套管柱工具;若分段压裂大于等于 3 段,建议采

用不动管柱投球滑套与拖动管柱组合管柱工具,防止过砂量多喷嘴磨损过大和砂埋管柱风险。

表 3 水力喷射压裂施工管柱工具技术特点

Table 3 Technical characteristics of construction pipe string tools for hydraulic jet fracturing

管柱工具	技术特点	局限性
常规管柱拖动	井下工具简单,长度短;工具外径小;有反洗通道,砂卡几率小	施工周期长
连续油管拖动	连续油管喷砂射孔,环空加砂压裂,砂塞留置,封堵已压井段,连续油管兼做冲砂洗井管柱,施工安全	对套管和套管头抗压及经常道路要求高;要求配套带压作业井口
不动管柱投球滑套	不动管柱,工具外径小,有反洗通道	井口施工压裂高;深井受限

2 海上水力喷射压裂及效果评价

水力喷射压裂已在陆地油田应用多次,但海上油田还未进行规模应用。以海上某油田 BH-1 井为例,说明油管加砂、环空补液的水力喷射压裂工艺技术及现场应用情况。

2.1 井的基本概况

BH-1 井位于渤海南部海域,采用 177.8 mm 套管完井。改造层位为东营组,目的层测深 3 330.0~3 337.0 m(垂深 3 200.6~3 206.9 m)和 3 157.3~3 167.9 m(垂深 3 034.7~3 044.8 m),储层平均孔隙度为 18%,平均渗透率为 $100\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$,为中孔中低渗储层。地层原油密度为 0.62~0.68 g/cm³,地层原油黏度为 0.35~0.76 mPa·s,饱和压力为 17.0~25.5 MPa,地饱压差为 3.0~15.5 MPa,溶解气油比为 110~190 m³/m³,原油体积系数为 1.348~1.693,地层压力梯度为 1.095 MPa/100 m,温度梯度为 3.23 ℃/100 m,压力系数 1.0,属于正常的温度、压力系统。

2.2 水力喷射压裂工艺参数

根据渤海油田以往施工经验,为提高裂缝闭

合后导流能力及改造效果,选用 20/40 目大粒径陶粒作为支撑剂,另外考虑到施工过程中保护水力喷射工具喷嘴的有效性,选用 40/70 目石英砂作为射孔砂。油管泵入的压裂液采用性能优越海水基瓜胶压裂液,套管泵入的压裂液采用低浓度的线性胶。

水力喷射压裂工具自下至上为:圆堵+打孔管+单流阀+水力喷枪+扶正器+变扣+钻杆/油管。工艺设计油管排量为 2.5 m³/min,油套环空排量为 1.6 m³/min,最高砂浓度为 720 kg/m³。

2.3 现场施工作业

作业流程用油管泵注,套管返出打开,将井筒替满线性胶,直至套管返出线性胶液。然后,油管泵注携砂液(石英砂),进行喷砂射孔。按设计量加完射孔砂,将射孔砂循环至地面。随后降低油管排量并关闭套管返出。若套压或油压不持续上涨或者有明显降落,说明喷砂射孔成功,且地层产生裂缝,之后按照设计泵注程序油管加砂压裂,环空补液方式进行施工。第一层压裂施工结束后,放喷返排至井口压力为零,上提管柱至第二层压裂施工,施工曲线如图 4、图 5 所示。

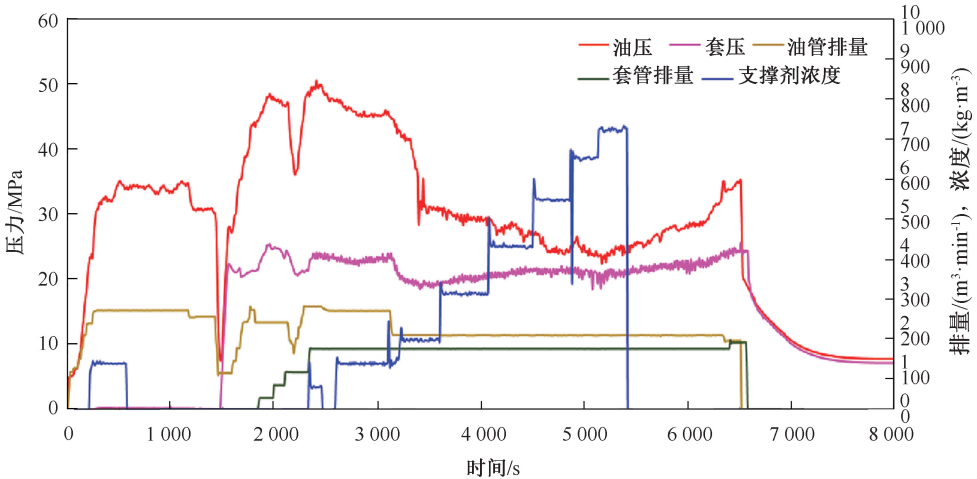


图 4 第一层水力喷射压裂施工图

Fig. 4 Hydraulic jet fracturing construction drawing of the first layer

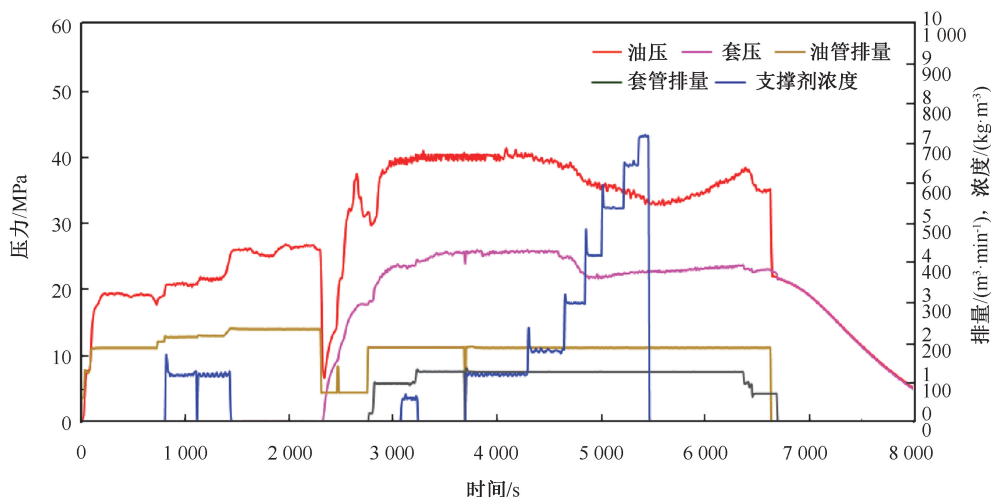


图5 第二层水力喷射压裂施工图

Fig. 5 Hydraulic jet fracturing construction drawing of the second layer

3 作业效果及评价

水力喷射压裂施工结束后,关井 30 min 扩散压力。随后,缓慢打开放喷阀门。先用 3 mm 油嘴放喷排液,直至油压低于 10 MPa 后使用 5 mm 油嘴放喷,直至油压低于 7 MPa 后使用 8 mm 油嘴放喷。当压力低于 3 MPa,可全开油嘴进行放喷,直至油压为 0。

起出压裂管柱,下入合采管柱,进行生产作业。压裂施工后 60 d 内生产数据如图 6 所示。最高产油量为 $99.80 \text{ m}^3/\text{d}$,平均产油量为 $77 \text{ m}^3/\text{d}$,平均产气 $1.37 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,平均产水 $20 \text{ m}^3/\text{d}$,达到了预期效果。压裂井试井解释结果:渗透率 $120 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,表皮系数 -5.2,储层压力 32.58 MPa,影响半径 600 m,裂缝半长 78.9 m,裂缝导流能力 $0.25 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 。该井水力喷射压裂作业顺利的实施,证实了该技术可行、有效,为后续海上中低渗储层改造提供了技术借鉴。

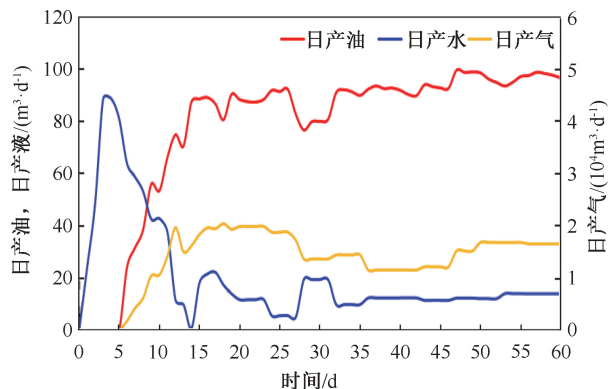


图6 生产数据

Fig. 6 Production data

4 结论

(1) 油管加砂环空补液水力喷砂压裂技术首次在海上低渗油田顺利、高效完成,同时生产数据和试井解释结果表明,水力喷射压裂可为未来海上中低渗储层改造提供技术工艺。

(2) 在喷枪参数优化方面,针对不同套管或井眼尺寸提出对应喷枪尺寸、喷嘴尺寸和喷嘴个数,减少压裂过程中对喷嘴过多的磨损。

(3) 在压裂管柱优选方面,若压裂段数小于 3 段可采用常规管柱拖动工具或不动管柱投球滑套。若分段压裂大于等于 3 段建议采用不动管柱投球滑套与拖动管柱组合工具。

致谢:感谢中海油田服务股份有限公司油田生产事业部同意本文公开发表;感谢技术专家王杏尊、郭布民对本文的大力指导和帮助。

参考文献

- [1] 夏玉磊,兰建平,詹勇. 水力压裂在油气田勘探开发中的运用之研究[J]. 化工管理,2017(29):216.
XIA Yulei, LAN Jianping, ZHAN Yong. Research on the application of hydraulic fracturing in oil and gas field exploration and development [J]. Chemical Enterprise Management, 2017(29):216.
- [2] MATH P W, SRIRAM S N, BUDOOR H A, et al. Fracture modeling in a weakly fractured carbonate reservoir, offshore UAE [C]. SPE 148018, 2011.
- [3] 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):53-55,59.
LI Yunzhe, REN Ze, WANG Yonggang. Application and analysis of minifrac test in offshore exploratory well [J].

- Well Testing, 2017,26(5):53-55,59.
- [4] VLADIMIR S, SERGEJ D, VLADIMIR L, et al. First hydraulic fracturing from a supply vessel in Russian Caspian Sea [C]. SPE 160754, 2012.
- [5] SERGEY M S, GREGORY D D. First hydraulic fracturing treatments improve HPHT well offshore India [C]. SPE 143560, 2011.
- [6] 郭少儒,张晓丹,薛大伟,等. 海上低渗油气藏平台压裂工艺研究与应用[J]. 中国海上油气,2013,25(2):64-67.
GUO Shaoru, ZHANG Xiaodan, XUE Dawei, et al. The research and application of platform fracturing technology for offshore low permeability reservoirs [J]. China Offshore Oil and Gas, 2013,25(2):64-67.
- [7] 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.
- [8] SURJAATMADJA J, MIRANDA C, RODRIGUES V, et al. Successful pinpoint placement of multiple fractures in highly deviated wells in deepwater offshore Brazil fields [C]. SPE 95443, 2005.
- [9] BILLY W M, LOYD E E, JIM BASUKI S. Use of hydrajet perforating to improve fracturing success sees global expansion [C]. SPE 114695, 2008.
- [10] 田守增,李根生,黄中伟,等. 水力喷射压裂机理与技术研究进展[J]. 石油钻采工艺,2008,30(1):58-62.
TIAN Shouceng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Research on hydrajet fracturing mechanisms and technologies [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(1):58-62.
- [11] 韩继勇,逢仁德,王书宝,等. 水力喷射环空压裂技术在长庆油田的应用[J]. 钻采工艺,2015,38(1):48-50.
HAN Jiyong, PANG Rende, WANG Shubao, et al. Application of hydraulic jet annulus sand-filled fracturing technology in Changqing Oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2015,38(1):48-50.
- [12] 全少凯,高德利. 基于阿基米德双螺旋线原理的水力喷射压裂技术[J]. 石油钻探技术,2018,46(1):90-96.
TONG Shaokai, GAO Deli. Hydraulic jet fracturing technology based on Archimedes spiral theory [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018,46(1):90-96.
- [13] 马梓涵. 水力喷射压裂工艺管柱性能改进[J]. 油气井测试,2019,28(2):56-60.
MA Zihan. Performance improvement of string for hydraulic jet fracturing technology [J]. Well Testing, 2019,28(2):56-60.
- [14] 李景彬,隆世明,张波,等. 水平井水力喷射环空加砂高强度拖动压裂工具的研制与应用[J]. 钻采工艺,2017,40(5):46-49.
- LI Jingbin, LONG Shiming, ZHANG Bo, et al. High-strength dragging type fracturing tool developed for annulus-sand-adding hydraulic fracturing [J]. Drilling & Production Technology, 2017,40(5):46-49.
- [15] 郑立军,方勇,刘建勋,等. 水力喷射压裂工艺在阿尔油田水平井压裂改造中的应用[J]. 油气井测试,2015,24(2):50-52.
ZHENG Lijun, FANG Yong, LIU Jianxun, et al. Application of hydraulic jet fracturing technology in horizontal well of Aer Oilfield [J]. Well Testing, 2015,24(2):50-52.
- [16] 吴照伟. 连续油管带底封分段压裂工艺在东胜气田的应用[J]. 油气井测试,2016,25(4):53-55.
WU Zhaowei. Application of sectional fracturing technique with coiled tubing and bottom packer in Dongsheng gas field [J]. Well Testing, 2016,25(4):53-55.
- [17] 曲海,李根生,刘营. 拖动式水力喷射分段压裂工艺在筛管水平井完井中的应用[J]. 石油钻探技术,2012,40(3):83-86.
QU Hai, LI Gensheng, LIU Ying. The application of dragged multistage hydrojet-fracturing in horizontal well with screen pipe completion [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012,40(3):83-86.
- [18] 董尚富. 一口疑难水平井的成功压裂改造[J]. 油气井测试,2017,26(2):68-69,72.
DONG Shangfu. Successful fracturing to a difficult horizontal well [J]. Well Testing, 2017,26(2):68-69,72.
- [19] 曲海,李根生,刘营,等. 水力喷射压裂射流密封压力场研究[J]. 流体机械,2012,40(11):21-24.
QU Hai, LI Gensheng, LIU Ying, et al. Simulation research of jet sealing pressure field during hydrajet fracturing [J]. Fluid Machinery, 2012,40(11):21-24.
- [20] 李根生,黄中伟,田守增,等. 水力喷射压裂理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2011:374-375.
- [21] 崔璐,黄少璞,康文泉,等. 射孔工况下多喷嘴水力喷射工具冲蚀研究[J]. 石油钻采工艺,2018,40(5):620-625.
CUI Lu, HUANG Shaopu, KANG Wenquan, et al. Study on erosion of multi-nozzle hydraulic jet tools under perforation condition [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018,40(5):620-625.
- [22] 李智,胥云,王振铎,等. 水力喷砂压裂工具喷嘴磨损分析[J]. 石油矿场机械,2010,39(11):25-28.
LI Zhi, XU Yun, WANG Zhenduo, et al. Analysis on nozzle wear of hydraulic sandblast fracturing tools [J]. Oil Field Equipment, 2010,39(11):25-28.

编辑 王 军

第一作者简介:王绪性,男,1988年出生,硕士,工程师,2013年毕业于中国石油大学(华东)油气井工程专业,现主要从事非常规油气开发技术研究及应用。电话:022-59551937; Email:wangxuxing1988@163.com。通信地址:天津市滨海新区海川路1581号,邮政编码:300450。