

# 水力喷射压裂工艺管柱性能改进

马梓涵

中国石油大庆油田有限责任公司采油工程研究院 黑龙江大庆 163453

通讯作者:Email:mazihan@petrochina.com.cn

引用: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.

Cite: MA Zihan. Performance improvement of string for hydraulic jet fracturing technology [J]. Well Testing, 2019,28(2):56-60.

**摘要** 针对水力喷射技术在大庆油田应用时存在压裂工具性能指标低,压裂过程中需要加砂易造成砂卡,导致管柱起不出的问题,采用 Solidworks 软件优化胶筒结构,并改进胶料配方,使胶筒抗拉强度提高 23%,残余变形率低于 3%;采用 Ansys 软件模拟并优化卡瓦受力状态,使卡瓦承受交变载荷的能力提升 50%,提高压裂工具的可靠性;设计封隔器排砂结构,并集成化设计管柱,管柱外径缩小 16%,整体长度缩短 25%,砂卡风险降低到 0;采用 Fluent 模拟将喷枪孔径优化为 4.5 mm,孔数优化为 4 个,相位角优化为 180°,提高射孔能力;设计“筒支梁”式接箍定位器,定位准确率 100%,提升工艺管柱的安全性。改进后的工艺管柱现场应用 84 口井,压裂 972 段,施工成功率 100%,其规模化应用为稳产提供了有力的技术支撑,并具有广阔的推广前景。

**关键词** 大庆油田;水力喷射;压裂管柱;射孔;封隔器;砂卡;定位器

**中图分类号**:TE357 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.02.010

## Performance improvement of string for hydraulic jet fracturing technology

MA Zihan

Oil Production Engineering Research Institute of PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd, Daqing, Heilongjiang 163453, China

**Abstract:** The application of hydraulic jet technology in Daqing Oilfield has the following problems: the first one is that the performance index of the fracturing tool was low; and the second one is that the sand plug was easy to be caused by adding sand during the fracturing process, which leads to the inability of tripping out the pipe string. In order to solve these problems, Solidworks software was used to optimize the structure of the rubber cylinder and improve the rubber compound formula, which increased the tensile strength of the rubber cylinder by 23% and the residual deformation rate is less than 3%. The Ansys software was used to simulate and optimize the kava stress state, which increased the ability of the kava to withstand alternating loads by 50%, thereby improving the reliability of the fracturing tool. In addition, the packer sand-discharging structure was designed, and integrated the design of the string, which made the outer diameter of the string reduced by 16%, the overall length was shortened by 25%, and the risk of sand plug was reduced to zero. Meanwhile, the Fluent simulation was used and the aperture of spray gun was optimized to 4.5mm, the number of holes was optimized to 4, the phase angle was optimized to 180°, and the perforating ability was improved. Finally, a “freely supported beam” type collar positioner was designed, which has a positioning accuracy of 100%, and greatly improved the safety of the pipe string. The improved string was used in 84 wells with 972 fracturing sections, and the construction success rate was 100%. Its large-scale application provided strong technical support for stable production and had broad prospects for popularization.

**Keywords:** Daqing Oilfield; hydraulic jet; fracturing string; perforation; packer; sand plug; locator

水力喷射压裂工艺始于国外,2007 年后国内开始应用,众多科研人员通过室内实验验证高速的携砂水射流可以射穿套管<sup>[1-3]</sup>,并对高压水射流射孔增产机理进行研究<sup>[4-6]</sup>,压力、流速、射孔距离都对射孔效果有影响,运用软件数值模拟并进行室内实验,得到最佳射孔增产参数。2009 年以后,水力喷射压裂工艺在国内各大油田开始现场应用<sup>[7-9]</sup>,但

很多井出现管柱无法下入并损坏工具的问题。由此,各大油田科研人员对管柱的下入过程进行了力学分析<sup>[10-12]</sup>,通过 ANSYS 等软件模拟,以及现场多次试验,解决了管柱下入难的问题<sup>[13-16]</sup>。但在现场施工时,工具的使用寿命往往很短,严重的影响了施工效率并增加了施工成本<sup>[17-19]</sup>。通过对试验后的工具进行分析,归纳出高压携砂水射流严重磨蚀工具,

是导致工具损坏的主要原因。许国文<sup>[20]</sup>对磨蚀机理进行研究,得到不同压力、流速下工具的磨蚀规律,在保证射孔效果的同时减小工具磨蚀量,提高工具使用寿命。虽然前人对水力喷射的原理进行了深入的研究,并做室内实验进行验证,进行现场应用分析并解决了大部分问题,但水力喷射技术在大庆油田的应用仍然存在问题有待解决:一是水力喷射压裂工具性能指标低;二是井下压裂过程中需要加砂,很容易造成砂卡,导致工艺管柱起不出。本文针对以上问题,优化了水力喷射压裂工具,提高了工具的使用寿命;进一步改进了水力喷射压裂管柱,解决了卡管柱的问题,并在孔立宏<sup>[21]</sup>对摩擦定位器研究的基础上,创新形成了新的定位技术,现场试验定位准确率 100%。目前,该项技术在大庆油田生产过程中应用范围越来越广泛,越来越成熟,且该工艺中关键工具设计理念先进,不仅仅应用于油井水平井压裂,还适用于深层气井<sup>[22]</sup>、直井大规模压裂领域,以及其他油田相关领域,具有广阔的推广前景。

1 水力喷射压裂封隔器的改进

封隔器包括胶筒、中心管、卡瓦以及弹性扶正器,如图 1 所示,其中胶筒的各项性能指标决定着封隔器重复坐封和解封的能力,卡瓦的结构参数、材质和热处理工艺决定着封隔器的锚定能力。

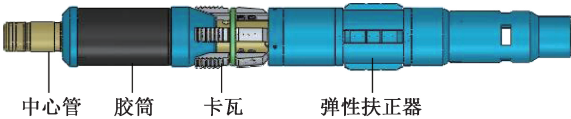


图 1 封隔器结构示意图  
Fig.1 Structural schematic diagram of packer

2.1 胶筒的改进

设计新型单向密封承压胶筒,其三维图如图 2 所示。

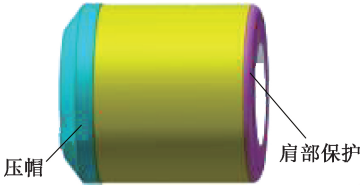


图 2 胶筒三维图  
Fig.2 Three-dimensional map of rubber cylinder

根据环空压裂胶筒单向承压工况,采用 Solidworks、Ansys 等软件对胶筒结构进行优化,将原连续三胶筒设计为压帽+锥形肩部保护结构的单胶筒,压帽限制胶筒承压变形,提高胶筒解封性能,锥形肩部保护降低坐封力,提高承压性能。改进胶料配

方并优选与之配伍的添加剂,抗拉强度提高 23%,残余变形率低于 3%。

2.2 卡瓦的改进

卡瓦在工作中将承受交变静载和动载,对其硬度、韧性、抗疲劳性能要求极高。通过 Ansys 软件模拟,结合室内及现场试验数据优化旋转角、根齿角、牙型角结构参数,改善受力状态,减少应力集中,使卡瓦承受交变载荷的能力提升 50%(图 3)。

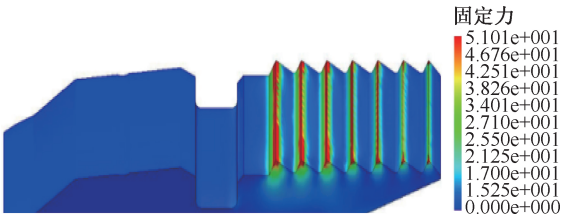


图 3 Ansys 模拟图  
Fig.3 Ansys simulation diagram

从图 3 可以看出,卡瓦每个牙齿受力均匀,减少了应力集中。

优选具有良好加工性能的超高强度合金钢,采用渗碳、激光处理等特殊工艺,有效解决卡瓦外表硬度高、内部韧性强的矛盾需求,提高抗疲劳性能。

3 水力喷射压裂工艺管柱改进

井下压裂过程中需要加砂,很容易造成砂卡,导致工艺管柱起不出,故需要研究形成“防砂+排砂”技术,提高多段压裂的可靠性和安全性。

3.1 优化封隔器防卡、解卡结构

采用 Ansys 模拟对卡瓦挂和中心管设计排砂结构,并将卡瓦置于存储仓进行防砂设计(图 4)。

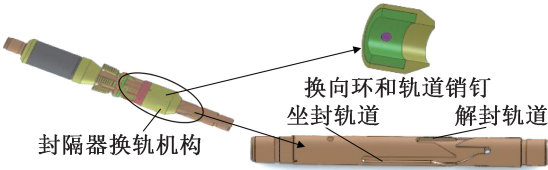


图 4 排砂结构示意图  
Fig.4 Schematic diagram of sand discharge

新增换轨保护、导流扶正设计,优化排砂结构参数。优化循环冲砂洗井机构,利于洗净卡瓦内外沉砂。

3.2 工艺管柱配套工具集成化

工艺管柱包括扶正器、喷枪、单流阀、平衡阀、Y211 封隔器,高导流扶正器集成化设计使管柱长度缩短 25%。优化工具结构参数,使管柱整体外径平均缩小 16%。优化后砂卡风险降低到 0。管柱的集成化设计如图 5 所示。

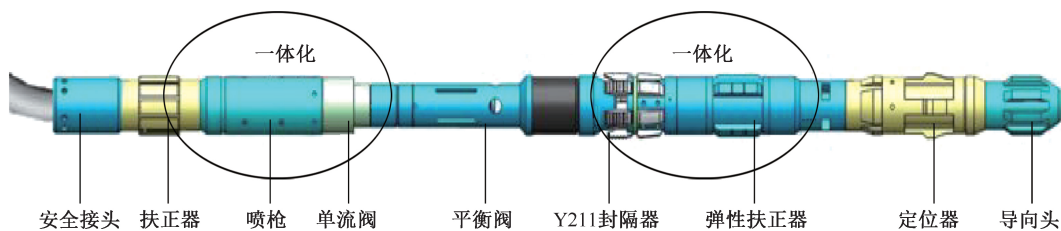


图 5 管柱集成化示意图

Fig.5 Schematic diagram of pipe string integration

### 3.3 优化喷枪射孔技术

将喷枪由分体结构变为整体结构,将喷嘴的组装方式由外嵌变为内嵌(图 6)。运用 Fluent 模拟,优化喷枪的各项参数,包括孔径为 4.5 mm,孔数 4 个,相位 180°(图 7)。经现场试验证明,改进后的喷枪射孔效果提高 1 倍。

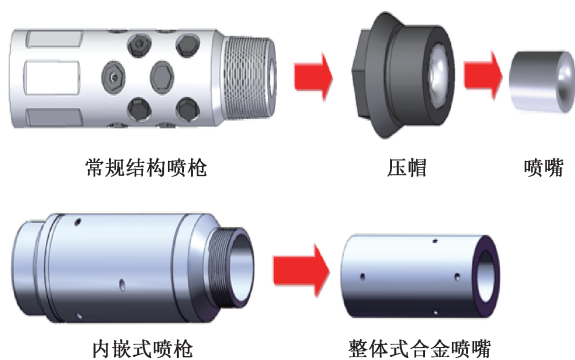


图 6 改变后喷枪结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of the spray gun

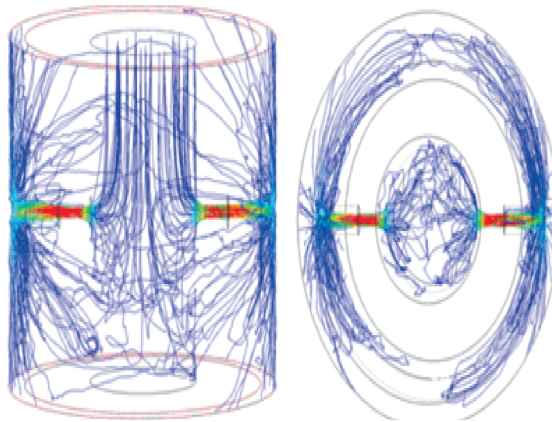


图 7 Fluent 模拟图

Fig.7 Fluent simulation diagram

### 3.4 创新定位器定位技术

创新研制“筒支梁”式弹性定位器,实现连续油管精准定位射孔。利用筒支梁只承受正弯矩原理,并采用 Solidworks 软件进行三维受力模拟,如图 8 所示。创新形成高定位力且稳定和可调的定位器(图 9)。现场试验结果表明,定位器定位准确率 100%。

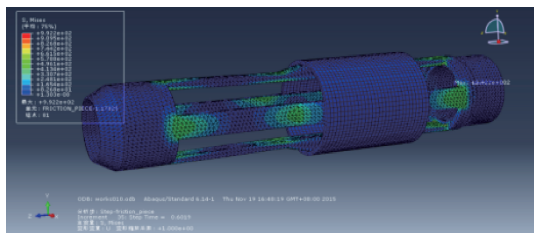


图 8 Solidworks 模拟图

Fig.8 Solidworks simulation diagram



图 9 定位器实物图

Fig.9 Physical map of locator

## 4 现场应用

高平 1 井是位于松辽盆地中央坳陷区大庆长垣葡萄花构造北翼上的一口水平井,完钻井深 2 290.0 m,人工井底 2 263.13 m,造斜点深度 1 228.0 m,水平段长 572.0 m,油层套管为外径 139.7 mm 的 P110 套管,抗内压 87.2 MPa。2016 年采用改进后的水力喷射压裂工艺进行现场试验,其工艺管柱由安全接头、扶正喷枪、封隔器、定位器、导向头组成。该井应用连续油管水力喷射环空加砂压裂工艺,42 h 施工时间内,一趟管柱完成 19 段压裂施工(图 10)。

由图 10 可见,该井最高施工压力 62 MPa,最大排量 6.7 m<sup>3</sup>/min,液量 8 814.5 m<sup>3</sup>,砂量 830.5 m<sup>3</sup>,管柱累计坐封、解封次数达 52 次,一次坐封、解封成功率 100%,创造了大庆油田单趟管柱压裂段数、液量、砂量和施工效率新纪录。

改进后的水力喷射压裂工艺管柱,在大庆油田推广 2 年,现场应用 84 口井,压裂 972 段,施工成功率 100%。该工艺管柱在大庆油田水平井压裂新一代技术中进行规模化应用,为大庆油田稳产提供了有力的技术支撑。



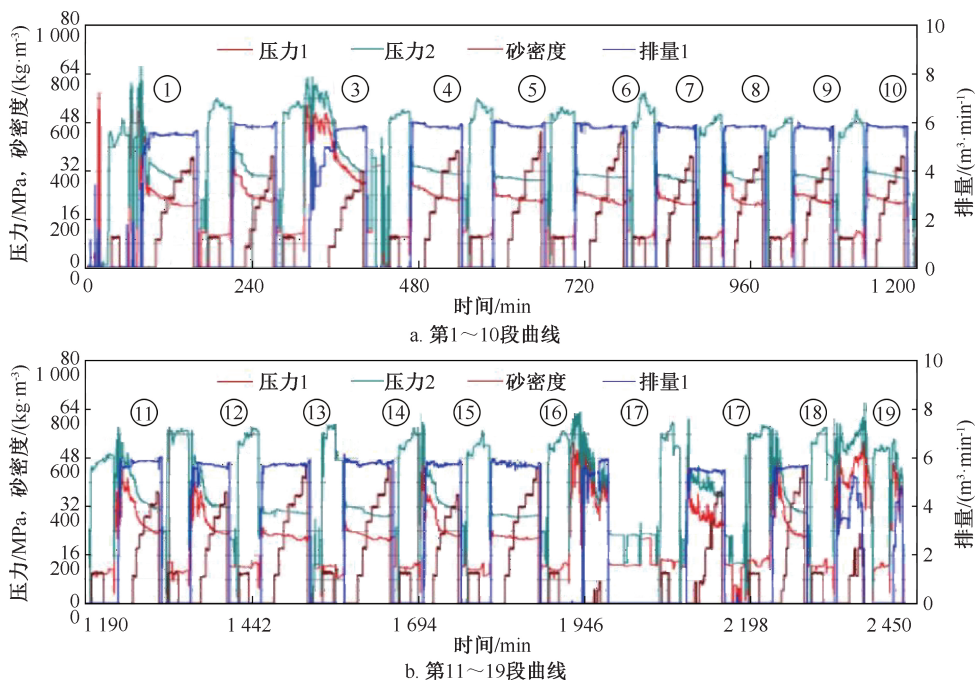


图10 高平1井压裂施工曲线图  
Fig.10 Fracturing construction curve of Well Gaoping 1

## 5 结论

(1)改进后的水力喷射压裂封隔器,可提高封隔器的坐封解封能力及防砂性能,可有效排砂,防止砂堆积,延长1倍使用寿命。

(2)优化后的水力喷射压裂工艺管柱,长度缩短25%,整体外径平均缩小16%。砂卡风险降低到0,且实现定位射孔,定位准确率100%。

(3)对压裂工具和压裂工艺管柱进行了优化,并在大庆油田水平井压裂新一代技术中进行规模化应用,为大庆油田稳产提供了有力的技术支撑。

(4)该工艺中关键工具设计理念先进,不仅仅应用于油井水平井压裂,还适用于深层气井、直井大规模压裂领域以及其他油田相关领域,具有广阔的推广前景。

**致谢:**本论文的理论、技术以及实验都得到了大庆油田采油工程研究院大力帮助,在此表示感谢;本文通过了大庆油田有限责任公司的保密审查。

## 参考文献

[1] 王鹏,王凤山,张倩. 环空加砂压裂管柱流体压降分析及现场应用[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(13): 178-181.  
WANG Peng, WANG Fengshan, ZHANG Qian. Pressure loss analysis and field application of annular delivery sand fracturing [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(13): 178-181.

[2] 田守增,李根生,黄中伟,等. 连续油管水力喷射压裂技术[J]. 天然气工业, 2008, 28(8): 61-63.  
TIAN Shouseng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Hydrojet-fracturing technology with coiled tubing [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(8): 61-63.

[3] 黄中伟,李根生,汪永章,等. 水力喷射压裂技术在3层套管井中的应用[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(5): 122-124.  
HUANG Zhongwei, LI Gensheng, WANG Yongzhang, et al. Hydra-jet fracturing applied in a well with three-layer casings [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(5): 122-124.

[4] 张毅,李根生,熊伟,等. 高压水射流深穿透射孔增产机理研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(2): 38-41.  
ZHANG Yi, LI Gensheng, XIONG Wei, et al. Stimulation mechanism of oil well using high-pressure water jet deep-penetrating perforation technique [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(2): 38-41.

[5] 蔡承政,李根生,黄中伟,等. 水力喷射注氮压裂工艺及参数设计计算[J]. 钻采工艺, 2014, 37(6): 45-48.  
CAI Chengzheng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Hydrojet injecting Nitrogen fracturing technology and its parameters design [J]. Drilling & Production Technology, 2014, 37(6): 45-48.

[6] 盛茂,李根生,黄中伟,等. 水力喷射孔内射流增压规律数值模拟研究[J]. 钻采工艺, 2011, 34(2): 42-45.  
SHENG Mao, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Numerical simulation of pressure boosting effect in jet hole during hydra-jet fracturing [J]. Drilling & Production



- Technology, 2011, 34(2): 42-45.
- [7] 王凤山, 张书进, 王文军, 等. 大庆油田低渗透水平井压裂改造技术新发展[J]. 大庆石油地质与开发, 2009, 28(5): 234-238.
- WANG Fengshan, ZHANG Shujin, WANG Wenjun, et al. New development of horizontal well fracturing stimulation technologies for low-permeability reservoirs in Daqing [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2009; 28(5): 234-238.
- [8] 王金友, 许国文, 李琳, 等. 连续油管拖动底封水力喷射环空加砂分段压裂技术[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(5): 69-72.
- WANG Jinyou, XU Guowen, LI Lin, et al. Technology of coiled tubing abrasive perforating and annulus fracturing [J]. Oil Field Equipment, 2016, 45(5): 69-72.
- [9] 吴涛. 水平井多段压裂技术在大庆油田的发展与应用[J]. 化学工程与装备, 2004(7): 169-171.
- WU Tao. Development and application of multistage horizontal well fracturing in Daqing Oilfield [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2004(7): 169-171.
- [10] 韩永亮, 刘志斌, 程智远, 等. 水平井分段压裂滑套的研制与应用[J]. 石油机械, 2011, 39(2): 64-65.
- HAN Yongliang, LIU Zhibin, CHENG Zhiyuan, et al. The development and application of the sectional fracture sliding sleeve in horizontal wells [J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(2): 64-65.
- [11] 董大忠, 邹才能, 杨桦, 等. 中国页岩气勘探开发进展与发展前景[J]. 石油学报, 2012, 33(8): 107-115.
- DONG Dazhong, ZOU Caineng, YANG Hua, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(8): 107-115.
- [12] 赵小龙, 董建国, 伊西锋, 等. 固井开关滑套多级分段压裂完井工艺技术分析[J]. 特种油气藏, 2014, 21(4): 145-147.
- ZHAO Xiaolong, DONG Jianguo, YI Xifeng, et al. Analysis on sliding sleeve staged fracturing completion for cased cementing [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(4): 145-147.
- [13] 马金良, 平恩顺, 李金凤. 可反复开关投球滑套的研制[J]. 油气井测试, 2017, 26(3): 49-53.
- MA Jinliang, PING Enshun, LI Jinfeng. Development of the repeatable and switchable dropping sliding sleeve [J]. Well Testing, 2017, 26(3): 49-53.
- [14] 胡忠太. 利用高扩张滑套开关工具关闭投球压裂滑套[J]. 油气井测试, 2018, 27(6): 68-72.
- HU Zhongtai. Closing the ball actuated fracturing sleeve with highly expanded sleeve switch tool [J]. Well Testing, 2018, 27(6): 68-72.
- [15] 李子丰, 孙虎, 苏金柱, 等. 压裂管柱力学分析理论与应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(5): 846-850.
- LI Zifeng, SUN Hu, SU Jinzhu, et al. Theory and applications of mechanical analysis of tubing string in fracturing operation [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(5): 846-850.
- [16] 王鹏, 王思淇, 张倩. 连续油管水力喷射压裂力学分析及现场应用[J]. 石油机械, 2016, 44(9): 98-103.
- WANG Peng, WANG Siqi, ZHANG Qian. Mechanical analysis and field application of hydraulic fracturing of coiled tubing [J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(9): 98-103.
- [17] 张毅. 连续油管水力喷射压裂管柱下入过程力学分析[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(7): 56-59.
- ZHANG Yi. Mechanical analysis of the running process of the coiled tubing in hydrojet-fracturing string [J]. Oil Field Equipment, 2016, 45(7): 56-59.
- [18] 张玉广, 张宏岩, 马梓涵, 等. 基于全息多反馈工具研发解决方案快速研制压裂工具[J]. 油气井测试, 2018, 27(6): 57-62.
- ZHANG Yuguang, ZHANG Hongyan, MA Zihan, et al. Rapid development of fracturing tools based on holographic multi-feedback tool development solution [J]. Well Testing, 2018, 27(6): 57-62.
- [19] 王鹏, 王凤山, 张倩. 连续油管压裂管柱轴向载荷传递规律研究[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(1): 20-23.
- WANG Peng, WANG Fengshan, ZHANG Qian. Research on axial load transfer of coiled tubing fracturing string [J]. Oil Field Equipment, 2016, 45(1): 20-23.
- [20] 许国文. 连续油管水力喷射冲蚀数值模拟研究[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(6): 12-15.
- XU Guowen. Numerical simulation research of coiled tubing hydraulic jet erosion [J]. Oil Field Equipment, 2016, 45(6): 12-15.
- [21] 孔立宏. 连续油管压裂管柱机械定位摩擦体数值模拟研究[J]. 采油工程文集, 2017(1): 28-31.
- KONG Lihong. Numerical simulation of mechanical positioning friction body of coiled tubing fracturing string [J]. Production Engineering, 2017(1): 28-31.
- [22] 李梅, 刘志斌, 吕双, 等. 连续油管喷射射孔环空分段压裂技术在苏里格气田的应用[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(4): 82-84.
- LI Mei, LIU Zhibin, LYU Shuang, et al. Application of coiled tubing jet perforation separated fracturing through annulus technique in Sulige gas field [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(4): 82-84.

编辑 刘振庆

第一作者简介: 马梓涵, 男, 硕士, 工程师, 1987 年出生, 2012 年毕业于中国石油大学(北京)材料工程专业, 现从事压裂增产改造研究工作。电话: 0459-5960615, 15045966157; Email: mazihan@petrochina.com.cn。通信地址: 黑龙江省大庆市让胡路区西宾路 9 号采油工程研究院, 邮政编码: 163453。