

小井眼连续油管多簇射孔填砂分段压裂技术——以百口泉油田百1断块X井为例

叶志权^{1,2}, 肖雷^{1,2}, 王丽峰^{1,2}, 薛浩楠^{1,2}, 王晗^{1,2}

- 1. 中国石油西部钻探井下作业公司 新疆克拉玛依 834000
- 2. 中国石油油气藏改造重点实验室页岩油储层改造分研究室 新疆克拉玛依 834000

通讯作者: Email: yeizq@cnpc.com.cn

引用: 叶志权, 肖雷, 王丽峰, 等. 小井眼连续油管多簇射孔填砂分段压裂技术——以百口泉油田百1断块X井为例[J]. 油气井测试, 2023, 32(1): 33-37.

Cite: YE Zhiquan, XIAO Lei, WANG Lifeng, et al. Multi-cluster perforating and sand-filling staged fracturing technology for slim hole coiled tubing — taking Bai1 Fault Block X well in Baikouquan oilfield as an example [J]. Well Testing, 2023, 32(1): 33-37.

摘要 百口泉油田属于低渗透油藏, 自然产能差, 经过长期开采, 能量已枯竭, 储层改造可以使其得到效益开发, 但目前侧钻小井眼体积压裂技术不成熟, 需要开展技术攻关。通过研究分析前期侧钻水平井分段压裂工艺的适应性和不足, 形成了侧钻小井眼压裂理论认识, 提出一套小井眼连续油管多簇射孔填砂体积压裂分段压裂工艺。该工艺首选采用连续油管多簇喷砂射孔, 然后在全通径套管内体积压裂技术改造, 最后尾追高浓度砂塞在井筒内填砂分段, 循环上述步骤从而逐级实现砂塞封隔、连续油管射孔、套管体积压裂一体化作业。通过在百口泉油田百1断块X井开展 $\phi 101.6\text{ mm}$ 套管侧钻小井眼水平井体积压裂实验, 验证了该工艺实施的可行性, 该井投产后, 日产油10.23 t, 超过同区块其它邻井, 压裂效果显著。该工艺技术成功解决了小井眼套管体积压裂难题, 实现了该区地层有效动用开发, 为后续开展“侧压一体化”效益开发提供新思路。

关键词 水力喷射; 多簇射孔; 井筒填砂; 分段压裂; 体积压裂; 侧钻水平井; 小井眼井; 现场应用

中图分类号: TE353 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.01.006

Multi-cluster perforating and sand-filling staged fracturing technology for slim hole coiled tubing —— taking bai 1 fault block X well in Baikouquan oilfield as an example

YE Zhiquan^{1,2}, XIAO Lei^{1,2}, WANG Lifeng^{1,2}, XUE Haonan^{1,2}, WANG Han^{1,2}

- 1. Downhole Service Company, CNPC Western Drilling Engineering Company Limited, Karamay, Xinjiang 834000, China
- 2. Shale Oil Stimulation Sub-Lab, Key Laboratory of Reservoir Stimulation, CNPC, Karamay, Xinjiang 834000, China

Abstract: Baikouquan oilfield is a low permeability reservoir with poor natural productivity. After long-term exploitation, the energy has been exhausted, and the reservoir reconstruction can make it benefit development. However, at present, the sidetracking slim hole volume fracturing technology is not mature, and technical research is needed. Through the research and analysis of the adaptability and shortcomings of staged fracturing technology for sidetracking horizontal wells in the early stage, the theoretical understanding of sidetracking slim hole fracturing was formed, and a set of staged fracturing technology for slim hole coiled tubing multiple cluster perforation and sand filling was proposed. This process is preferred to adopt coiled tubing multi-cluster sandblasting and perforating, and then carry out volume fracturing technical transformation in the full-bore casing. Finally, the high-concentration sand plug is followed up and filled in the wellbore by sand sections. The above steps are circulated to realize the integrated operation of sand plug plugging, coiled tubing perforating, and casing volume fracturing step by step. The feasibility of the implementation of this technology has been verified through the volume fracturing experiment of the slim hole horizontal well with 101.6 mm casing sidetracking in Well X of Bai1 Block in Baikouquan Oilfield. After the well is put into production, the daily oil production of this well is 10.23 tons, which is more than other temporary wells in the same block, and the fracturing effect is remarkable. This technology has successfully solved the problem of casing volume fracturing in slim hole, realized the effective production and development of the formation in this area, and provided a new idea for the follow-up development of “integration of lateral pressure” benefits.

Keywords: hydraulic injection; multiple cluster perforations; sand filling in shaft; staged fracturing; volume fracturing; sidetracking horizontal well; slim hole well; field application

目前,常见的水平井分段压裂改造工艺主要有电缆泵送桥塞分簇射孔联作、连续油管水力喷砂射孔环空压裂以及裸眼封隔器投球滑套三种。其中桥塞射孔联作和连续油管水力喷砂射孔环空压裂对于完井质量和井筒尺寸有较高的要求^[1-3],井眼轨迹复杂等因素可能会造成的泵送桥塞遇阻遇卡,连续油管底封下不到位等各种问题,而裸眼封隔器投球滑套仅仅适用于新井完井后的措施改造^[4-5]。

随着油气田的不断开发,常规的压裂工艺已经无法满足生产的需求,老区开展开窗侧钻水平井分段压裂改造成为提高单井产量的重要方向^[6-8]。国内很多油田开展了小井眼侧钻完井压裂方面的研究与应用^[9],赵广民等^[10]针对气田侧钻水平井完井分段压裂优缺点,结合气田开发特点,研发小直径裸眼封隔器,进一步降低完井作业成本;胡忠民等^[11]针对新疆油田小井眼侧钻与裸眼分段完井过程中开窗点深、石炭系可钻性差等难题,研究低孔、低渗储层改造配套工艺,最终形成了小井眼侧钻井钻完井及压裂一体化技术;程智远等^[12]针对小井眼开发过程中技术瓶颈,研究形成了压裂一体化管柱,在小井眼完井管串中连接固井压裂滑套,减少射孔、刮削、下分层压裂管柱等工序,缩短建井周期。

虽然固井滑套或裸眼封隔器投球滑套完井有众多优点,但从储层改造角度分析,存在地层启裂困难、施工排量小(无法实现大规模体积压裂)、改造效果受限、井筒不是全通径、不方便投产后期井下作业等问题。为解决相关技术难题,结合侧钻井完井工艺特点,本文通过探索研究提出连续油管多簇喷砂射孔井筒填砂分段体积压裂技术,并在新疆油田百口泉采油厂百1断块X井完成首次应用,取得了良好的效果。

1 工艺特点

侧钻水平井井眼比较小,压裂改造难度大,常规完井工艺改造规模有限,常规的套管压裂桥塞分段工艺无法简单的复制。新疆油田百口泉采油厂侧钻水平井一般采用 $\phi 139.7\text{ mm}$ 套管开窗,下入 $\phi 88.9\text{ mm}$ 尾管连接裸眼封隔器+投球滑套或 $\phi 101.6\text{ mm}$ 尾管固井完井。连续油管多簇射孔填砂分段体积压裂技术是一种多技术融合的组合技术,其中包括连续油管多簇水力喷砂射孔、体积压裂、填砂分段。

该技术核心在于小井眼的填砂分段,其基本原理是在层段间人为注入高砂浓度携砂液(砂浓度超过 $1\ 200\text{ kg/m}^3$)从而在近井地带的裂缝内及井筒形成砂堵,代替传统底部封隔器的作用实现层间封隔^[13-16]。由于采用非机械方式封隔分段,对井眼轨迹和井筒尺寸要求较小、可实现无限级分段,因套变无法下入桥塞的施工井中经常使用。常用的连续油管喷砂射孔填砂管柱结构自上而下为:卡瓦连接器+液压丢手接头+单翼扶正器+接箍定位器+喷砂射孔枪+扶正循环阀。一趟管柱可实现填砂、冲砂、探砂面、分段、多簇喷砂射孔,解决小井眼水平井的精细分段、避水避射、难以实现定向压裂改造等难题。

2 工艺流程

连续油管多簇喷砂射孔井筒填砂分段压裂工艺流程为:

(1)地面施工准备,安装注入头、防喷器、防喷管等,进行拉力测试、管线试压;

(2)连接工具串,下入带喷砂射孔工具的连续油管,通过MCCL接箍定位器定位至指定位置,采用合适的排量进行分簇喷砂射孔,并完成射孔砂顶替;

(3)提出连续油管,倒流程,进行全通径套管体积压裂,在泵注结束阶段采用尾追高砂浓度砂塞方式进行分段填砂;

(4)下入连续油管至设计层段进行探砂(保证砂面已沉降 $1\sim 2\text{ h}$),若砂面深度过高则冲砂至预定高度;若砂面深度过低(填砂不合格)则通过环空再次填砂,直至砂面高度合格;

(5)采用小排量试挤,进一步压实砂塞,对填砂砂面进行全井筒试压,停泵后虽会有压降,但启泵后瞬间升至超压,对于新层压裂不影响,视为试压合格。若不合格则重复步骤4、5直至试压合格;

(6)重复步骤2、3、4、5进行下一段的射孔、压裂和井筒填砂,直至完成所有压裂作业;

(7)最后下入连续油管尾带冲砂工具串冲洗井筒砂塞,恢复井筒全通径并投产。

3 工艺参数优化

结合连续油管多簇喷砂射孔井筒填砂分段压裂的工艺特点,针对现场施工井基本情况,通过相关软件计算模拟,对相关参数进一步进行优化。

3.1 水力喷砂射孔

射孔排量等相关的重要参数为喷嘴的个数与直径,其显著影响喷嘴产生的压降。在保证有效射孔的前提下,喷嘴产生的压降和连续油管的摩阻之和要满足井口与顶部连续油管的承压范围。根据喷嘴的个数、直径、排量等相关参数,计算出不同射孔排量下的喷流速度和喷嘴压降,从而确定射孔排量和预估施工压力。

其中喷流速度计算公式为

$$v = \frac{2.13 \times 10^4 Q}{nd^2}$$

喷嘴节流压降计算公式为

$$P = \frac{1\,848.78 Q^2 \rho}{A^2 C^2}$$

式中: v 为喷流速度, m/s ; Q 为射孔排量, m^3/min ; n 为喷嘴数量, 个; d 为喷嘴直径, mm ; P 为喷嘴节流压降, MPa ; ρ 为过喷嘴液体密度, kg/m^3 ; A 为喷嘴总面积, mm^2 ; C 为流量系数, 一般取 0.9。

侧钻井 $\phi 101.6\text{ mm}$ 套管内径 88.3 mm, 钢级 N80, 通过计算分析, 如图 1 所示选用 $\phi 50.8\text{ mm}$ 连续油管配合 4 个 4.76 mm 喷嘴, 射孔排量在 0.7~0.8 m^3/min 时, 喷射速度可达到 163.9~187.3 m/s , 喷射磨料选用 20/40 目石英砂, 喷射时间 10 min, 喷砂浓度 120.0 kg/m^3 , 可以射穿套管, 满足现场要求。

3.2 填砂

通过环空向预设封堵层位泵入高浓度石英砂携砂液, 并完成顶替, 上提连续油管停泵, 待石英砂沉降, 低排量启泵吹挤砂桥, 形成致密砂塞。

填砂量计算公式为

$$V = \frac{\pi d^2}{4} L k$$

式中: V 为填砂体积, m^3 ; d 为井眼内径, m ; L 为填砂段长度, m ; k 为附加系数, 取值 2。

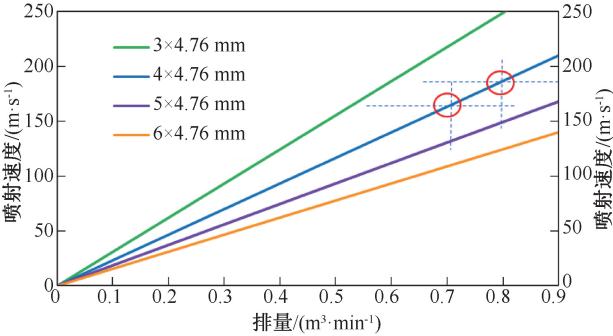


图 1 不同规格喷嘴不同排量下的喷射速度
Fig. 1 The injection velocity of different nozzles with different displacement

为确保填砂质量, 试压合格, 根据套管内容积附加缝口吹填量计算填砂量。小尺寸套管内径小, 根据公式计算以及附加量确定做砂塞砂量为 1 m^3 。

3.3 体积压裂

采用大排量大砂量的施工工艺, “打碎” 地层岩石, 建立地下复杂缝网, 沟通人工裂缝、天然裂缝和次生裂缝, 形成体积压裂 (SRV) 区, 增大裂缝和油藏间的接触面积, 缩短渗流距离, 提高油气运移效率。根据侧钻井小井眼尺寸进行施工压力参数计算, 选用 $\phi 139.7\text{ mm} \times 7.72\text{ mm}$ N80 套管 + $\phi 101.6\text{ mm} \times 6.65\text{ mm}$ N80 尾管组合压裂管柱结构时, 井口采用 70 MPa 井口。施工排量控制在 6.0~8.0 m^3/min , 施工压力为 32~40 MPa。通过压裂软件模拟, 得到不同加砂规模下的裂缝参数 (见图 2)。

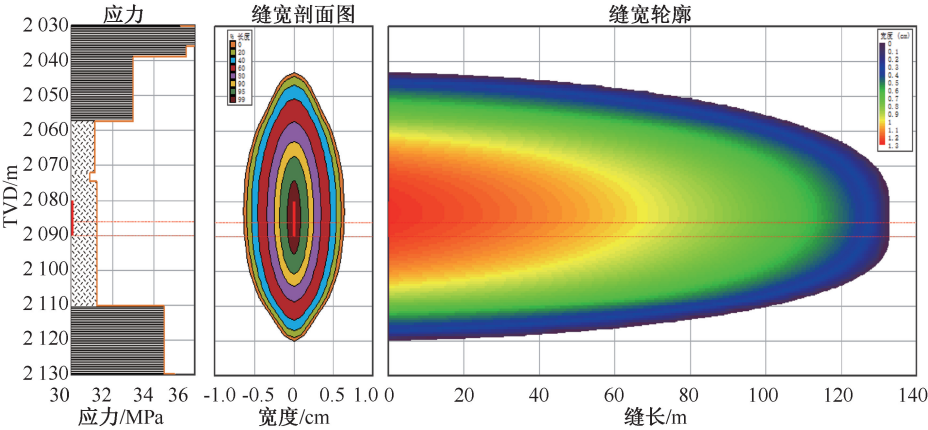


图 2 30 m³ 加砂规模裂缝剖面图
Fig. 2 30 m³ sand-adding scale fracture profile

从图2可以看出,在110~120 m的支撑缝长下,合理的加砂规模为单簇加砂 30 m^3 。

4 现场应用

百口泉油田百1断块乌尔禾组油藏平均埋深1 900 m左右,X井采用 $\phi 139.7\text{ mm}$ 套管+ $\phi 101.6\text{ mm}$ 尾管固井完井,排量 $6\sim 8\text{ m}^3/\text{min}$,主加砂压力在 $18\sim 25\text{ MPa}$ 之间,最高砂浓度 $540\text{ kg}/\text{m}^3$,加砂相对较易;本井共分段6级,其中第1~2、5~6

级施工,破裂压力较高,在 $30\sim 38\text{ MPa}$ 之间,效果较为明显;第3级射孔3簇,整体施工压力较低。在连续油管多簇射孔井筒填砂压裂中,本井采用降黏快速提砂比+欠顶替的填砂模式,在填砂分段压裂后期的井筒填砂阶段,通过陡然提高砂浓度,降低压裂液黏度,在顶替末尾阶段,通过降排量加“欠”顶替的方式,使得高砂浓度支撑剂在井筒内部自由沉降制造“砂堵”,形成人工砂塞(见图3)。

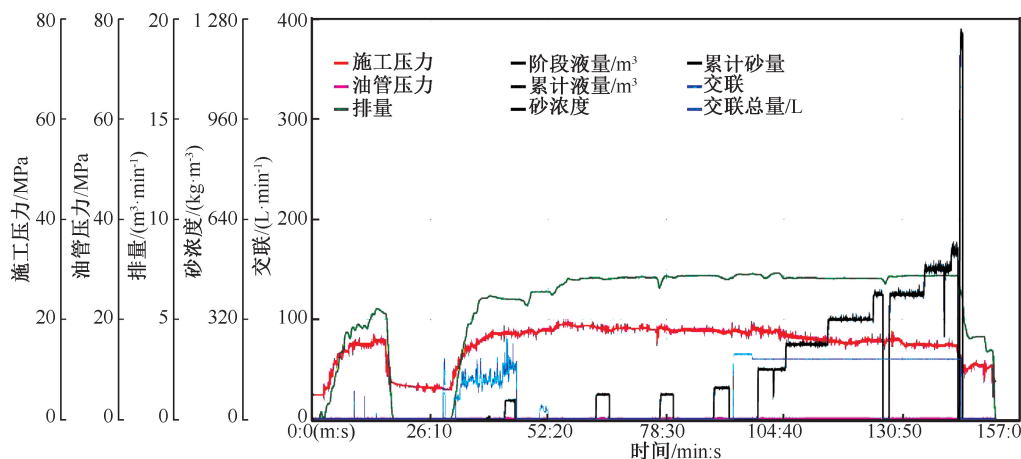


图3 X井第3级施工曲线

Fig. 3 x well stage 3 construction curve

施工过程中各段地层破裂压力不同,未出现压力突降情况,说明砂塞分段封隔质量可靠。压后投产,日产油 10.23 t ,超过同区块其它邻井,压裂效果显著。

5 结论

(1)连续油管多簇射孔井筒填砂分段体积压裂技术在加砂末端做砂塞过程中,宜采用液体降黏快速提砂比+欠顶替的填砂模式,待砂塞自有沉降1小时后,快速提排量造“砂堵”。

(2)在射孔顶替阶段,建议顶替2倍井筒容积以上(或者采用高黏液体洗井1.5倍井筒容积),保证在上提连续油管过程中井筒清洁干净,保证后续施工连续,避免沉砂砂堵。

(3)填砂完成后试挤阶段,建议先采取小排量试挤,进一步压实砂塞,观看压力平稳后再“阶梯型”提排量至设计排量,不能提排量过快。

(4)从施工压力上看,连续油管水力喷砂多簇射孔在一定程度上控制井筒附近裂缝起裂和延伸,有效减少近井多裂缝和裂缝弯曲,提高了射孔效率,为高砂浓度支撑剂进入地层提供了有效通道。

(5)连续油管多簇射孔井筒填砂分段体积压裂工艺对小井眼水平井具有较好的适应性,集合了连续油管定点喷射、套管体积压裂、砂塞软封隔等众多工艺的优点,为此类井的分段压裂改造提供了可行的技术手段。

致谢:感谢西部钻探井下作业公司储层改造研究中心同意本文公开发表。感谢樊庆虎副总工程师、李帅帅二级工程师、徐亚军主任等人在论文修改、成果总结方面做出的贡献。

参考文献

- [1] 刘祖林,杨保军,曾雨辰.页岩气水平井泵送桥塞射孔联作常见问题及对策[J].石油钻采工艺,2014,36(3):75-78.
LIU Zulin, YANG Baojun, ZENG Yuchen. Common problems of pumping bridge plug and clustering perforation for horizontal shale gas well and countermeasures [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(3): 75-78.
- [2] 汪小龙,杨勇.水力喷砂射孔填砂压裂技术研究[J].内蒙古石油化工,2017,43(2):65-69.
WANG Xiaolong, YANG Yong. Study on hydraulic sand-blasting perforated sand-filled fracturing technology [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2017, 43(2): 65

- 69.
- [3] 裴楚洲. 连续油管分簇射孔技术及应用[J]. 天然气工业, 2014, 34(S1): 123-125.
PEI Chuzhou. Cluster perforating technology of coiled tubing and its application [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(S1): 123-125.
- [4] 李宾. 水平井分段压裂工艺技术研究[J]. 石化技术, 2021, 28(12): 206-207.
LI Bin. Study on horizontal well subsection fracturing technology [J]. Petrochemical Technology, 2021, 28(12): 206-207.
- [5] 姚彬. 气田裸眼水平井分段压裂工艺技术及其应用探讨[J]. 新型工业化, 2021, 11(6): 231-232.
YAO Bin. Open hole horizontal well fracturing technology and its application in gas field [J]. New Industrialization, 2021, 11(6): 231-232.
- [6] 孙宁. 侧钻水平井应成为老区油气低产井改造增产的重要技术政策[J]. 石油科技论坛, 2018, 37(2): 28-35.
SUN Ning. Sidetrack horizontal well should become an important technical policy for the old area oil and gas low-production well transformation to increase production [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2018, 37(2): 28-35.
- [7] 李宪文, 王历历, 王文雄, 等. 基于小井眼完井的压裂关键技术创新与高效开发实践——以苏里格气田致密气藏为例[J]. 天然气工业, 2022, 42(9): 76-83.
LI Xianwen, WANG Lili, WANG Wenxiong, et al. Key fracturing technology innovation and high efficiency development practice based on slim hole completion - taking tight gas reservoir of Sulige gas field as an example [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(9): 76-83.
- [8] 苏良银, 常笃, 杨海恩, 等. 低渗透油藏侧钻水平井小井眼分段多簇压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(6): 94-98.
SU Liangyin, CHANG Du, YANG Haien, et al. Subsection multi-cluster fracturing technology in slim hole of Sidetrack horizontal well in low permeability reservoir [J]. Oil Drilling Technology, 2020, 48(6): 94-98.
- [9] 李萍, 范永涛, 刘泳敬, 等. 侧钻井钻完井一体化工程可行性探讨[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(1): 8-13.
LI Ping, FAN Yongtao, LIU Yongjing, et al. Feasibility study on integrated sidetracking and completion engineering [J]. Oil Drilling and Production Processes, 2019, 41(1): 8-13.
- [10] 赵广民, 李宪文, 王治国, 等. 气田侧钻水平井分段压裂工艺及关键工具探讨[C]//2017年全国天然气学术年会论文集. 2017: 1383-1390.
ZHAO Guangmin, LI Xianwen, WANG Zhiguo, et al. Discussion on the subsection fracturing technology and key tools of sidetracked horizontal wells in gas field [C]//Proceedings of 2017 National Natural Gas Academic Annual Conference, 2017: 1383-1390.
- [11] 胡忠民. 小井眼侧钻井钻完井技术研究与应[C]. 中国石油集团西部钻探工程有限公司, 2016-07-21.
HU Zhongmin. Research and application of sidetrack drilling and completion technology in slim hole [C]. Petrochina Western Drilling Engineering Co., Ltd., July 21, 2016.
- [12] 程智远. 长庆地区小井眼开发关键技术研究-小井眼完井压裂技术研究[C]. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司工程技术研究院, 2019-11-13.
CHENG Zhiyuan. Truong Khanh Area slim hole development key technology research-slim hole completion fracturing technology research [C]. Engineering and Technology Research Institute of China Petroleum Group Bohai Sea Drilling Engineering Co., Ltd., November 13, 2019.
- [13] 王金刚, 孙虎, 任斌, 等. 填砂分段压裂技术在页岩油套变水平井的应用[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(4): 139-142.
WANG Jinggang, SUN Hu, REN Bin, et al. Application of sand-filled segmented fracturing technique in variable horizontal wells with shale oil sleeves [J]. Oil Drilling Technology, 2021, 49(4): 139-142.
- [14] 梁兴, 朱炬辉, 石孝志, 等. 缝内填砂暂堵分段体积压裂技术在页岩气水平井中的应用[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 82-89.
LIANG Xing, ZHU Juhui, SHI Xiaozhi, et al. Application of subsection volume fracturing technique with sand filling in fractures in horizontal shale gas wells [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 82-89.
- [15] 石孝志, 张俊成, 焦亚军, 等. 连续油管多簇喷砂射孔填砂暂堵分段体积压裂技术[J]. 钻采工艺, 2020, 43(6): 35-37.
SHI Xiaozhi, ZHANG Juncheng, JIAO Yajun, et al. Multistage fracturing technique with coiled tubing multi-cluster hydraulic jet perforating and sand bridging in hydraulic fractures for shale gas reservoirs [J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(6): 35-37.
- [16] 姜勇, 刘锐, 赵晓伟, 等. 连续油管填砂分层环空压裂技术[J]. 内蒙古石油化工, 2018, 44(2): 79-82.
JIANG Yong, LIU Rui, ZHAO Xiaowei, et al. Annular fracturing technology with sand-filled coiled tubing and delamination [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2018, 44(2): 79-82.

编辑 吴志力

第一作者简介:叶志权,男,1986年3月出生,大学本科,工程师,2008年毕业于长江大学资源勘查工程专业,现主要从事储层改造研究工作。电话:0990-6609768,13519907188, Email: yeizq@cnpc.com.cn。通信地址:新疆维吾尔自治区克拉玛依市克拉玛依区纬六路571号,邮政编码:834000。