

# 牛东火山岩油藏水平井重复压裂技术

邓有根,郑波,李一朋,岳翰林,鲍黎

中国石油集团西部钻探工程有限公司吐哈井下作业公司 新疆鄯善 838200

通讯作者:Email: dengyijx@petrochina.com.cn

项目支持:中国石油吐哈油田科技项目“水平井老井重复压裂技术”(JGSS2c2019048)

引用:邓有根,郑波,李一朋,等. 牛东火山岩油藏水平井重复压裂技术[J]. 油气井测试,2021,30(5):32-36.

Cite: DENG Yougen, ZHENG Bo, LI Yipeng, et al. Refracturing technology for horizontal wells in Niudong volcanic oil reservoir [J]. Well Testing, 2021,30(5):32-36.

**摘要** 针对三塘湖盆地牛东火山岩非常规油藏采用衰竭式开采引起地层能量下降,水平井产能递减较快,采出程度低等问题,开展了水平井重复压裂技术研究。通过地质研究与评价,优选压裂甜点层段,采用注水吞吐与暂堵转向压裂工艺相结合的技术思路,优选水溶性暂堵剂,对暂堵分级、暂堵剂用量、暂堵剂加注浓度、加注方式进行优化,暂堵压裂过程压力响应明显。2017-2019 年在牛东火山岩非常规油藏现场应用 58 井次,压后平均增油达 9.1 t/d,平均单井累计增油 730 t,增产效果显著。该研究对非常规油藏水平井重复压裂具有借鉴意义。

**关键词** 牛东火山岩;非常规油藏;重复压裂;暂堵剂;转向压裂;注水吞吐;水平井

**中图分类号**:TE377 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.05.006

## Refracturing technology for horizontal wells in Niudong volcanic oil reservoir

DENG Yougen, ZHENG Bo, LI Yipeng, YUE Hanlin, BAO Li

Tuha Downhole Operation Company, CNPC Western Drilling Engineering Co., Ltd., Shanshan, Xinjiang 838200, China

**Abstract:** The depletion production of Niudong volcanic unconventional oil reservoir in Santanghu basin has resulted in the decrease of formation energy, the rapid decline of horizontal well productivity and the low recovery degree. In response to these issues, the research on refracturing technology used in horizontal wells is carried out in this paper. Through geological research and evaluation, the fracturing ‘sweet spots’ were selected. Based on the technical idea of combining water swallowing-spitting with temporary plugging and diverting fracturing technology, water-soluble temporary plugging agents were selected. Moreover, the temporary plugging classification, the addition amount of temporary plugging agents, the concentration of temporary plugging agents and injection method were optimized. Obvious pressure response was observed during the temporary plugging and fracturing operation. During 2017-2019, the technology has been applied 58 well times in Niudong volcanic unconventional oil reservoir, the average oil production after fracturing has increased by 9.1 t/d, and the average single-well cumulative oil production increased by 730 t, indicating a significant increase in production. This technology has a great signification for the refracturing of horizontal wells in unconventional oil reservoir.

**Keywords:** Niudong volcanic rock; unconventional oil reservoir; refracturing; temporary plugging agent; diverting fracturing; water swallowing-spitting; horizontal wells

水平井体积压裂技术是非常规油藏实现经济有效开发的主要增产技术措施<sup>[1]</sup>。但随着油田开发的深入,受地层孔隙压力下降、支撑剂破碎、嵌入等因素影响,水平井压后裂缝导流能力降低或失效,单井产能递减较快,采出程度低<sup>[2]</sup>。水平井重复压裂是老井挖潜剩余油重要方式之一,是实现油田稳产与提高采收率的重要手段<sup>[3]</sup>。

三塘湖盆地牛东火山岩储层目的层为下二叠统卡拉岗组,油藏属于裂缝-孔隙型火山岩油藏,构

造轴部裂缝、孔洞发育,油藏埋深一般在 2 000 m 以内,目的层段岩性复杂,主要为玄武岩、安山岩夹薄层碎屑岩,黏土矿物主要是蒙脱石、伊利石和绿/蒙混层<sup>[4]</sup>。次生孔隙及微裂缝发育,具有强烈的非均质性。岩芯孔隙度 8.4%~14.2%,有效渗透率  $0.75 \times 10^{-3} \sim 18.87 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。比较发育的次生溶蚀孔洞或原生气孔、孔洞是储油的主要空间,连通的微裂缝、裂缝是油气渗流的主要通道。储层为异常低压系统,地层温度为 47.2~54.6℃,属中低温温

度系统。前期采用水平井体积压裂技术取得了较好的开发效果,但由于衰竭式开发引起地层能量下降,导致单井产量递减较快,采出程度低。根据三塘湖盆地牛东火山岩油藏特征,通过借鉴国内外水平井重复压裂成功经验,优选重复压裂改造甜点,提出将注水吞吐与暂堵转向压裂相结合的重重复压裂改造技术思路。该技术能有效补充地层能量,扩大裂缝波及体积,提高单井产量,延长压裂有效期,从而最终提高牛东火山岩油藏的采收率。

## 1 技术思路

优选重复压裂改造甜点,提出将注水吞吐与暂堵转向压裂相结合的重重复压裂改造技术思路。

### 1.1 水平井重复压裂

水平井重复压裂就是对水平井初次压裂工艺技术、改造程度、压后效果进行压前综合评估,通过重重复压裂恢复老缝导流能力,压开新缝,实现新老裂缝共同贡献产量,以达到提高单井产量目的<sup>[5-6]</sup>。结合牛东火山岩油藏特征,分别从地质及工艺方面开展研究,提出重复压裂技术思路:①通过产液剖面测试结果,进行重复压裂选井选段<sup>[7-8]</sup>,尤其是“甜点”层段,提高重复压裂选层的准确性和针对性,为重复压裂奠定物质基础;②通过注水吞吐,压裂前小排量或大排量超破压注水,补充地层能量,促进老缝开启程度增加,并产生新的裂缝,扩大油水置换面积;③实施大排量、大液量、大砂量体积压裂配套暂堵转向压裂技术,提高裂缝的改造体积和复杂性,实现水平井各段各簇得到均衡改造。

### 1.2 注水吞吐

注水吞吐技术在各大油田有广泛的应用<sup>[9-11]</sup>,它的主要机理是在补充地层能量情况下,利用毛管力在亲水性油藏中的吸水排油作用使注入水吸入到基质中并滞留,从而把原油驱替到高渗层,实现油水重新分布,最终渗吸置换出的原油与注入水一起被采出<sup>[12-13]</sup>。注水吞吐主要有3个方面的作用:①增加或者保持地层压力;②裂缝内流体的重力分异作用;③毛细管力的吸水排油作用。注水阶段,储层将大量注入水吸入缝面小孔隙和基质微孔并滞留其中,从而将孔隙和微孔中的原油驱到高渗区;而注入水部分进入并驻留在低渗孔道,实现水油渗吸置换。通过对牛东火山岩注水吞吐技术对比,采用大排量( $10\sim 14\text{ m}^3/\text{min}$ )超破压注水吞吐造缝效果

最好。通过数值模拟计算,注入液体由 $5\,000\text{ m}^3$ 提升至 $15\,000\text{ m}^3$ ,地层压力由 $1.10\text{ MPa}$ 提升至 $3.08\text{ MPa}$ ,3年累计产量能够提高 $17.8\%$ 。因此,优化压前最优注水吞吐量 $5\,000\sim 15\,000\text{ m}^3$ ,注采比达2.5以上,开展暂堵压裂效果最好。

### 1.3 暂堵转向压裂

流体转向就是封堵低阻力通道,迫使流体通过高阻力通道<sup>[14-15]</sup>。利用暂堵剂实现水平井暂堵分级压裂改造<sup>[16-18]</sup>。

#### 1.3.1 水平井暂堵压裂技术原理

暂堵压裂首先压开低地应力高渗层,然后加入暂堵颗粒封堵裂缝口及射孔孔眼,随着孔眼摩阻增大,使液体分流转向至高地应力低渗层,再对低渗层实施充填加砂改造,周而复始,实现水平井各段各簇的均衡改造,从而共同贡献产量<sup>[19-20]</sup>。水平井暂堵压裂提高压裂措施针对性,有效提高单井产能。

#### 1.3.2 暂堵剂优选

结合牛东火山岩储层温度特征,优选低温水溶性暂堵颗粒。暂堵剂常温下为固体颗粒, $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时视密度为 $1.2\text{ g/cm}^3$ ,在温度 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温水浴条件下, $6\text{ h}$ 后溶解率大于 $95\%$ 。施工结束,焖井过程中封堵自动解除。通过对暂堵剂渗透率伤害实验评价,转向材料滤饼( $15\text{ mm}$ )对人造岩心平均伤害程度仅 $12.8\%$ ,低于压裂液对储层伤害程度。通过楔形裂缝的物模实验,初步探索了裂缝内形成暂堵的材料优化组合与暂堵深度,复合粒径暂堵剂封堵效率高,且通过实验探索出合适的转向材料复合模式:粉末+中等颗粒+大球,结合现场试验优选出适合牛东火山岩油藏水平井压裂的暂堵剂组合:( $1\sim 5\text{ mm}$ )暂堵颗粒+( $5\sim 10\text{ mm}$ )暂堵颗粒+( $11\sim 13\text{ mm}$ )暂堵颗粒。经现场应用,取得较好的封堵效果。

#### 1.3.3 暂堵级数优化

由于初次压裂瞬时停泵压力能够真实反应各段储层裂缝延伸压力、地应力及储层物性。瞬时停泵压力接近或相差不大的层段,可以认为储层的裂缝延伸压力相近,也可以推断出初次压裂时进液多少或改造的程度。在参考水平段测井解释数据的基础上,根据初次压裂各段裂缝延伸压力确定暂堵压裂级数,以NDP-X井暂堵分级为例。图1为NDP-X井初次压裂各段停泵压力统计图。根据停泵压力,将重复压裂分为三级:第一级,第1、4、6段

瞬时停泵压力最低(23.0~24.0 MPa, 约为23.6 MPa);第二级,第2、3段瞬时停泵压力(27.0~28.0 MPa, 约为27.7 MPa);第三级,第5段瞬时停泵压力最高(31.7 MPa)。因此,采用三级两次暂堵压裂施工。

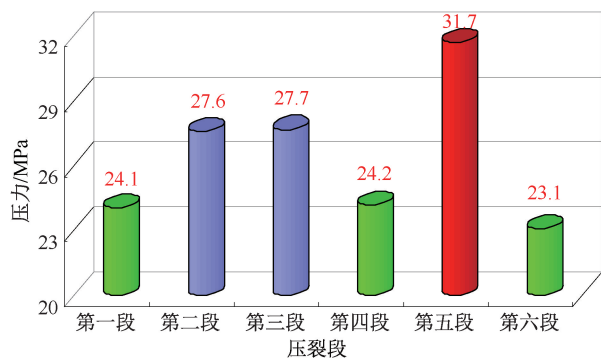


图1 NDP-X井初次压裂各段停泵压力统计图

Fig. 1 The statistics of the pump-off pressure in each stage of the initial fracturing of Well NDP-X

### 1.3.4 暂堵剂用量计算

根据每级预测裂缝起裂的条数设计每级暂堵剂加量。由此,单级暂堵剂加量采用以下公式计算,即

$$M = 2HWLN\rho$$

式中: $H$ 为缝高(软件模拟),m; $\rho$ 为暂堵剂密度, $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $W$ 为缝宽(软件模拟),m; $N$ 为裂缝条数(根据初次压裂延伸压力及测井资料预测); $L$ 为不同粒径暂堵剂侵入深度(根据室内实验预测),m。

### 1.3.5 暂堵剂加注浓度优化

经过调研,国内外暂堵剂加注浓度一般为3%~5%。根据室内暂堵剂升压实验结果,并结合现场试验封堵升压情况,不断优化暂堵剂加注浓度,暂堵

剂加注浓度由150 kg/min (15%) 优化为目前250 kg/min (25%)。通过优化暂堵剂加注浓度,暂堵剂封堵效率不断提高。

### 1.3.6 暂堵剂加注方式优化

优化暂堵剂加注流程,暂堵压裂泵车使用单独混砂车供液,由于大粒径暂堵剂不能顺利通过常规压裂泵液力端,加注暂堵压裂泵车液力端改装成球式密封,确保加注的暂堵剂能顺利通过,暂堵压裂施工得以高效运行。

## 2 现场应用

2017年,在牛东火山岩油藏开展水平井重复压裂技术研究。通过充分分析前期地质资料、作业井史、生产动态数据,优化暂堵分级级数、暂堵剂加量等参数,实现水平井重复暂堵分级压裂改造。

### 2.1 应用举例

NDP-X井水平段长度为473 m,前期采用双封单卡拖动分4段压裂,压后初期日产液8.6 m<sup>3</sup>,日产油6.4 t。重复压裂前日产液8.0 m<sup>3</sup>,日产油2.3 t。为提高单井产能,对该井井段(1 616.5~2 084.0 m/467.5 m)采用注水吞吐+重复暂堵转向压裂技术,于2017年9月15日,对NDP-X井实施三级暂堵转向压裂。主要施工参数:施工排量14 m<sup>3</sup>/min,注水吞吐10 000 m<sup>3</sup>,采用滑溜水+超低浓度胍胶压裂液2 200.2 m<sup>3</sup>,支撑剂采用20~40目石英砂189 m<sup>3</sup>,1~5 mm颗粒暂堵剂350.0 kg、5~10 mm颗粒暂堵剂443.8 kg、11.0~13.0 mm颗粒暂堵剂166.1 kg。

暂堵剂到位压力爬坡响应分别是6.6 MPa、7.2 MPa,压力响应明显(图2)。

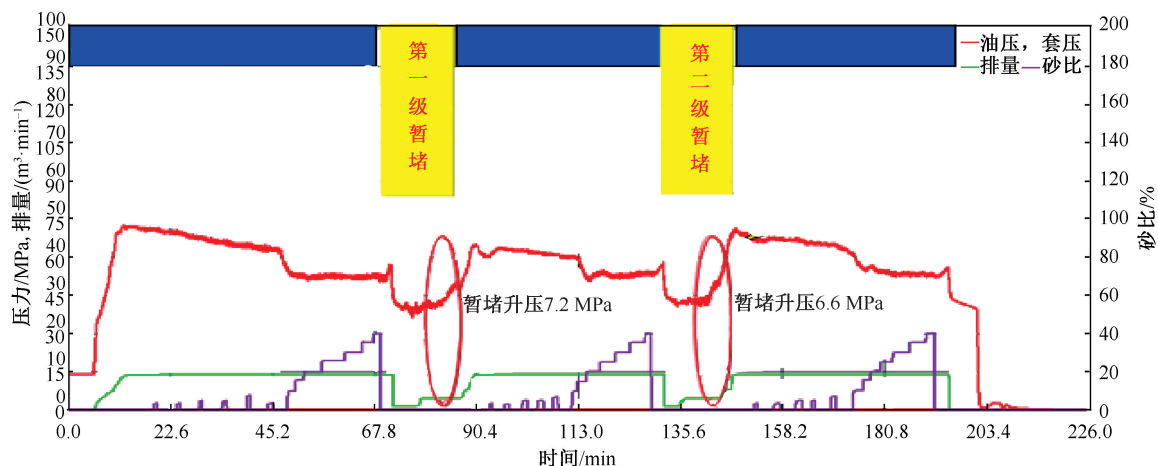


图2 NDP-X井重复暂堵转向压裂施工曲线

Fig. 2 Operation curve of repeated temporary plugging and diverting fracturing in Well NDP-X

图3为该井重复暂堵压裂前后生产曲线。可以看出,NDP-X井暂堵压裂后初期日产液 $30.0\text{ m}^3$ ,日产油 $19.8\text{ t}$ ,日增油 $18.3\text{ t}$ 。压后稳定产油 $10.5\text{ t/d}$ ,

是压裂前4.5倍。截至目前,压后累计产油 $3\,698\text{ t}$ ,增油 $2\,768\text{ t}$ 。按照目前60美元/桶的油价计算,投入产出比为1.0:3.2,具有明显的经济效益。

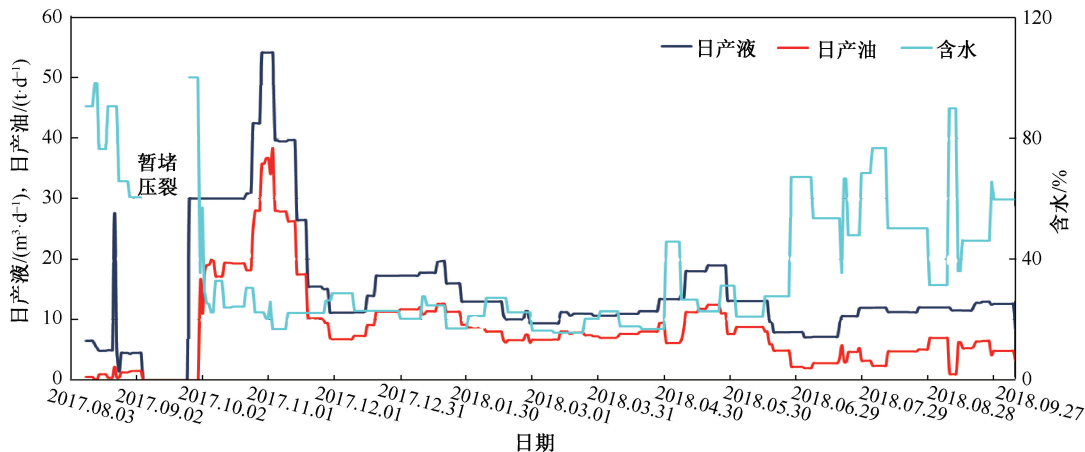


图3 NDP-X井重复暂堵压裂前后生产曲线

Fig. 3 Production curve before and after repeated temporary plugging fracturing of Well NDP-X

## 2.2 重复压裂效果

从2017年开始截至目前,在牛东火山岩油藏实施注水吞吐+水平井重复暂堵压裂58井次,有效率100%,压裂后平均单井日增液 $14.6\text{ m}^3$ ,日增油 $9.1\text{ t}$ ,平均单井增油 $730\text{ t}$ ,平均有效期达172 d。

## 2.3 效果评价和分析

如图4是牛东水平井重复暂堵压裂压力响应分布图。从图中可以看出,水平井暂堵转向压裂技术暂堵压力响应值在 $3.0\sim 30.5\text{ MPa}$ 之间,平均 $9.4\text{ MPa}$ ,暂堵剂压力响应明显,暂堵剂封堵效率处于国内先进水平。

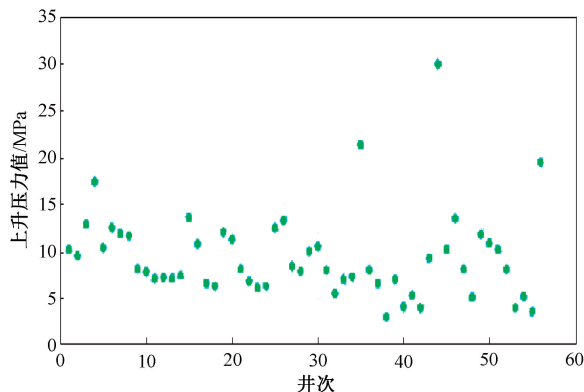


图4 牛东水平井重复暂堵压裂压力响应分布图

Fig. 4 Pressure response distribution during temporary plugging refracturing operation of Niudong horizontal well

通过对比分析,牛东火山岩油藏暂堵压裂后,产量与入井液量呈一定正相关关系,与入井砂量关系不明显。分析认为,入井液量越大,改造体积越大,压后增产效果越明显。通过对牛东区块暂堵升

压值与压后产量关系,从措施效果分析,暂堵升压 $7\sim 9\text{ MPa}$ ,压后增油效果相对较好。

## 3 结论

(1)通过采用注水吞吐与暂堵转向压裂工艺相组合,有效地补充了地层能量,扩大了裂缝改造体积,重复压裂效果显著,对三塘湖盆地牛东火山岩油藏重复压裂具有重要的意义。

(2)压后效果分析,暂堵压裂效果与注采比、压裂入井液量关系较大,注采比大于2.5暂堵压裂效果较好。

(3)暂堵升压与暂堵剂类型、暂堵分级、暂堵剂加注浓度有关。经现场实践,暂堵升压明显,处在国内先进水平。

(4)注水吞吐+暂堵转向重复压裂技术在牛东火山岩油藏实施效果好,极具推广价值,为国内外非常规油藏水平井重复压裂提供了借鉴。

致谢:感谢吐哈井下作业公司同意本论文发表;感谢为本论文提供基础数据的工程技术人员。

## 参考文献

- [1] 吴奇,胥云,刘玉章,等. 美国页岩气体积改造技术现状及对我国的启示[J]. 石油钻采工艺,2011,33(2):1-7. WU Qi, XU Yun, LIU Yuzhang, et al. The current situation of stimulated reservoir volume for shale in U. S. and its inspiration to China [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(2):1-7.
- [2] 李卫成,叶博,张艳梅,等. 致密油水平井体积压裂攻关试验区单井产量主控因素分析[J]. 油气井测试,2017, 26(2):33-36.



- LI Weicheng, YE Fu, ZHANG Yanmei, et al. Analysis of the primary controlling factors to single-well output of horizontal well of tight oil with volumetric fracturing at experimental area [J]. Well Testing, 2017, 26(2): 33-36.
- [3] 向洪. 三塘湖盆地马56区块致密油重复压裂实践[J]. 特种油气藏, 2017, 24(6): 157-160.
- XIANG Hong, Refracturing practice of tight oil reservoirs in Ma 56 block, the Santanghu Basin [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2017, 24(6): 157-160.
- [4] 荆文波, 孙欣华, 陈昶旭, 等. 牛东火山岩储层分布研究[J]. 吐哈油气, 2011, 16(3): 205-209.
- JIN Wenbo, SUN Xinhua, CHEN Changxu, et al. Study on distribution of volcanic reservoir in Niudong [J]. Tuha Oil & Gas, 2011, 16(3): 205-209.
- [5] 孟祥灿. 大情字井油田A区块重复压裂增产技术[J]. 油气井测试, 2020, 29(5): 44-49.
- MENG Xiangcan. Repeated fracturing stimulation to Block A in Daqingzijing Oilfield [J]. Well Testing, 2020, 29(5): 44-49.
- [6] 曾凌翔. 页岩气水平井增产改造关键参数分析[J]. 油气井测试, 2020, 29(5): 27-32.
- ZENG Lingxiang. Analysis of key stimulation parameters for shale gas horizontal wells [J]. Well Testing, 2020, 29(5): 27-32.
- [7] GRIESER B, CALVIN J, DULIN J, et al. Lessons learned: Refracs from 1980 to present [C]. SPE 179152, 2016.
- [8] VINCENT M. Restimulation of unconventional reservoirs: When are refracs beneficial? [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2011, 50(5): 36-52.
- [9] 吴忠宝, 曾倩, 李锦, 等. 体积改造油藏注水吞吐有效补充地层能量开发的新方式[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(5): 78-83, 92.
- WU Zhongbao, ZENG Qian, LI Jin, et al. New effective energy-supplement development method of waterflood huff and puff for the oil reservoir with stimulated reservoir volume fracturing [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(5): 78-83, 92.
- [10] 代旭. 大液量注水吞吐技术在致密油藏水平井中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(6): 134-139.
- DAI Xu. Application of massive waterflooding huff-puff technique in the tight oil reservoir for horizontal wells [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(6): 134-139.
- [11] 杨亚东, 杨兆中, 甘振维, 等. 单井注水吞吐在塔河油田的应用[J]. 天然气勘探与开发, 2006, 29(2): 32-35.
- YANG Yadong, YANG Zhaozhong, GAN Zhenwei, et al. Application of water flood huff and puff with single in Tahe Oil Field [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2006, 29(2): 32-35.
- [12] 黄大志, 向丹. 注水吞吐采油机理研究[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(5): 39-40, 43.
- HUANG Dazhi, XIANG Dan. Study of oil production mechanism by water-flood stimulation [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2004, 11(5): 39-40, 43.
- [13] 李晓辉. 致密油注水吞吐采油技术在吐哈油田的探索[J]. 特种油气藏, 2015, 22(4): 144-146, 158.
- LI Xiaohui. Development and application of separate-layer fracturing string in low-permeability reservoir with thin alternating layers [J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2015, 22(4): 144-146, 158.
- [14] 吴国涛, 薛世杰, 王永贤, 等. 复合暂堵剂暂堵技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(6): 51-56.
- WU Guotao, XUE Shijie, WANG Yongxian, et al. Research on temporary plugging technology of composite temporary plugging agent [J]. Well Testing, 2018, 27(6): 51-56.
- [15] 马如然, 刘音, 常青, 等. 油田压裂用暂堵剂技术[J]. 油田化学, 2013, 31(6): 79-81.
- MA Ruran, LIU Yin, CHANG Qing, et al. New technology of diverting agents used in oilfield fracturing [J]. Oilfield Chemistry, 2013, 31(6): 79-81.
- [16] 汪小宇. 压裂用水溶性暂堵剂的研究与现场应用[J]. 石油化工应用, 2015, 34(6): 91-94.
- WANG Xiaoyu. The development and application of water-soluble fracturing temporary plugging agent [J]. Petro-Chemical Industry Application, 2015, 34(6): 91-94.
- [17] 赵明伟, 高志宾, 戴彩丽, 等. 油田转向压裂用暂堵剂研究进展[J]. 油田化学, 2018, 35(3): 538-544.
- ZHAO Mingwei, GAO Zhibin, DAI Caili, et al. Advancement of temporary plugging agent for fracturing in oilfield [J]. Oilfield Chemistry, 2018, 35(3): 538-544.
- [18] 王博, 周福建, 邹雨时, 等. 水平井暂堵分段缝间干扰数值模拟方法[J]. 断块油气田, 2018, 25(4): 506-509.
- WANG Bo, ZHOU Fujian, ZOU Yushi, et al. Numerical simulation method of fracture interaction during temporary plugging staged fracturing [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(4): 506-509.
- [19] 苏良银, 庞鹏, 达引朋, 等. 低渗透油田暂堵重复压裂堵剂用量优化与现场试验[J]. 断块油气田, 2014, 21(1): 114-117.
- SU Liangyin, PANG Peng, DA Yinpeng, et al. Usage optimization and field test of blocking agent for temporal-blocked re-fracturing in low permeability oilfield [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(1): 114-117.
- [20] 郭建春, 陶亮, 曾凡辉. 致密油储集层水平井重复压裂时机优化——以松辽盆地白垩系青山口组为例[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 146-154.
- GUO Jianchun, TAO Liang, ZENG Fanhui. Optimization of refracturing timing for horizontal wells in tight oil reservoirs: A case study of Cretaceous Qingshankou Formation, Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 146-154.

编辑 刘振庆

第一作者简介: 邓有根, 男, 1986年10月出生, 工程师, 2009年毕业于中国石油大学(北京)地质工程专业, 现主要从事压裂酸化工艺技术研究及现场管理工作。电话: 0995-8373320, 13179957654; Email: dengyujx@petrochina.com.cn。通信地址: 新疆鄯善县新城东路1967号, 邮政编码: 838200。