

# 致密气水平井提高缝控体积压裂技术

王艳玲<sup>1</sup>, 郝春成<sup>1</sup>, 邵光超<sup>2</sup>

1. 中国石油吉林油田公司油气工程研究院 吉林松原 138000

2. 中国石油吉林油田二氧化碳开发公司 吉林松原 138000

通讯作者: Email: wyl1613@163.com

项目支持: 国家科技重大专项“致密油储层高效体积改造技术”(2016ZX046004); 中国石油天然气股份公司重大科技专项“松辽盆地南部致密油气成藏及动用技术研究”(2017B-4905)

引用: 王艳玲, 郝春成, 邵光超. 致密气水平井提高缝控体积压裂技术[J]. 油气井测试, 2022, 31(6): 40-44.

Cite: WANG Yanling, HAO Chun Cheng, SHAO Guangchao. Fracturing technology for improving fracture control volume in tight gas horizontal wells [J]. Well Testing, 2022, 31(6): 40-44.

**摘要** 水平井密切割能够缩短渗流距离, 随着裂缝间距的缩小, 间接增加分段段数使投资成本增多; 多簇射孔排量分流, 单簇排量降低, 导致多簇开启程度低, 裂缝扩展不一, 进而“缝控体积”受限。“密切割+平面周向射孔+大排量高砂比加砂”为主的水平井提高缝控体积压裂技术研究结果表明: 多簇限流射孔、配合层间暂堵技术, 能够提高簇密度、控制总孔数, 保证多簇均匀开启; 平面周向射孔技术, 避免近井多裂缝的形成, 实现单簇单缝的有效扩展; 大排量高铺砂浓度加砂技术, 确保了多簇裂缝均匀扩展, 提高导流能力。2020 年吉林油田致密气现场开展 3 口水平井试验, 证实了平面周向射孔较常规螺旋射孔有效率提高 30.7%; 且最高加砂速度 3.8 m<sup>3</sup>/min, 最高砂比 61%, 压后均获工业气流, 最高获 16.2×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 高产气流, 效果显著。该技术为非常规资源高效动用和效益开发提供了借鉴。

**关键词** 水平井; 密切割; 多簇限流; 层间暂堵; 平面周向射孔; 高铺砂浓度加砂; 缝控体积压裂; 致密气

中图分类号: TE357 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.06.008

## Fracturing technology for improving fracture control volume in tight gas horizontal wells

WANG Yanling<sup>1</sup>, HAO Chun Cheng<sup>1</sup>, SHAO Guangchao<sup>2</sup>

1. Research Institute of Oil Production Technology of Jilin Oilfield Company, Jilin Songyuan, 138000, China

2. PetroChina Jilin Oilfield Carbon Dioxide Development Company, Jilin Songyuan, 138000, China

**Abstract:** Horizontal well tight cutting can shorten the seepage distance, and with the reduction of fracture spacing, the investment cost increases indirectly by increasing the number of segments. The displacement of multiple clusters of perforations is diverted, and the displacement of single clusters is reduced, resulting in low opening degree of multiple clusters and different crack expansion, which in turn limits the “sewing control volume”. The research results of “dense cutting + plane circumferential perforation + large displacement high sand ratio plus sand” can improve the seam control volume fracturing technology of horizontal wells and show that multi-cluster flow limiting perforation and interlayer temporary plugging technology can improve the cluster density, control the total number of holes, and ensure the uniform opening of multiple clusters. Plane circumferential perforation technology avoids the formation of multiple cracks near the well and realizes the effective expansion of a single cluster and a single seam; The large-displacement and high-concentration sand adding technology ensures the uniform expansion of multiple clusters of cracks and improves the diversion capacity. In 2020, three horizontal wells were tested at the tight gas site in Jilin oilfield, which confirmed that the efficiency of planar circumferential perforation was 30.7% higher than that of conventional spiral perforation. And the maximum sand adding speed is 3.8 m<sup>3</sup>/min, the highest sand ratio is 61%, and the industrial air flow is obtained after pressing, and the highest is 16.2×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, obvious effect. This technology provides a reference for the efficient use of unconventional resources and the development of benefits.

**Keywords:** Horizontal well; Dense cutting; Multi cluster flow limiting; Interlayer temporary plugging; Plane circumferential perforation; High sand concentration sand addition; Fracture controlled volume fracturing; Tight gas

致密气储集层岩石致密、连通性差、自然产能低, 需通过压裂改造才能实现效益开发<sup>[1]</sup>。随着致

密气勘探开发的不断深入, 于学亮等<sup>[2]</sup>基于 Comsol 建立了离散裂缝网络数值模型, 对“密切割”体积改

造油藏进行仿真模拟,研究了裂缝间距、井距、裂缝复杂程度对增产效果的影响。朱海燕等<sup>[3]</sup>根据胜利油田页岩油储层的地质工程特征,开展射孔簇簇数、射孔孔眼数量、压裂施工参数等多对裂缝流体流量分配、应力干扰及裂缝几何形态影响的数值模拟研究发现:单簇裂缝扩展时,裂缝诱导应力最优波及距离为10 m左右;簇间距为10 m时,三簇裂缝均衡扩展射孔密度为20孔/m,施工排量为12 m<sup>3</sup>/min,压裂液黏度为30 mPa·s;4个射孔簇时,压裂液均匀分配和裂缝均衡扩展的簇间距为10 m。吴奇等<sup>[4]</sup>系统阐述了体积改造技术的基本内涵、优化设计及实现方法。认为采用缩小簇间距的水平井“密切割”压裂技术,能够大幅度缩短基质中流体向裂缝渗流的距离,降低基质流体向裂缝渗流所需的驱动压差,是实现致密储层有效动用的关键核心技术。但随着裂缝间距的缩小,间接增加分段段数,进而增加分段工具的使用成本及作业成本,任佳伟等<sup>[5]</sup>从研究裂缝扩展规律及扩展形态入手,基于扩展有限元方法建立裂缝扩展数值模型,明确了天然裂缝发育及小水平应力差是形成复杂缝网的必要条件,阐述了密切割压裂改造技术在目标油藏的适用性。基于地质工程一体化思想,利用数值模拟方法,在保持压裂投入不变的前提下,对比不同裂缝参数组合方案的产油能力。范宇等<sup>[6]</sup>分析了Zi2井初期采用常规分段压裂工艺,在压裂设计指标执行率较低的情况下,开展了密切割分段压裂工艺现场试验,裂缝复杂程度及单井储集层改造体积提升明显。同时,在压裂过程中,通常采用分簇限流技术实现小间距压裂施工,由于多簇射孔排量分流不均致使分簇开启程度低,使得分簇簇裂缝扩展受限。基于上述问题,提出了“密切割+平面周向射孔+大排量高砂比加砂”为主的水平井提高缝控体积压裂技术,通过密切割缩短渗流距离,基于限流射孔和层间暂堵技术实现多簇均匀开启;采用平面周向射孔和大排量+高铺砂浓度加砂技术保证多簇裂缝均匀有效扩展,使得人工裂缝波及到的储量范围最大化,形成缝控基质单元,实现对未动用储量的挖掘,提高单井产能。

## 1 多簇限流射孔、配合层间暂堵压裂技术

通过多簇限流射孔工艺控制射孔孔眼和孔眼直径,利用先开层的孔眼摩阻,提高井底压力,迫使

压裂液分流,使破裂压力接近的地层相继被压开。但未考虑簇间应力差异性,致使单簇排量分流不均,簇间开启程度不一,扩展不均衡。配合层间暂堵压裂工艺通过在缝口和炮眼处投不同数目的大粒径可降解暂堵球封堵低应力射孔孔眼,迫使压裂液转向高应力区的射孔簇,平衡应力差异性射孔簇裂缝的有效开启和扩展<sup>[7-8]</sup>,弥补多簇限流射孔工艺的不足。

限流压裂的成功与否与很多因素有关,其中孔眼摩阻关系最为密切。室内设计根据下面的孔眼摩阻公式,计算不同施工排量、孔眼直径条件下,孔眼数与孔眼摩阻的关系,即

$$p_{\text{Pf}} = \frac{0.237 \times q^2 \times \rho}{C_d^2 \times d_p^2 \times n^2} \quad (1)$$

式中:  $p_{\text{Pf}}$  为孔眼摩阻, MPa;  $q$  为排量, m<sup>3</sup>/min;  $\rho$  为压裂液流体密度, g/cm<sup>3</sup>;  $C_d$  为孔眼流量系数(一般取0.8~0.85);  $d_p$  为孔眼直径, mm;  $n$  为孔眼数, 孔。

(1)式在保证射孔孔眼摩阻大于簇间最大应力差值条件下,优化单段孔眼数;若不能同时开启的簇,配合层间炮眼球暂堵,保证有效开启,依据吉林油田致密气储集层投球暂堵经验,投球数量为总炮眼数的70%。

## 2 平面周向射孔技术

非常规水平井开发通常沿地层最小主应力方向布井,在井筒高边采用零相位射孔,压裂过程中因裂缝转向弯曲等因素造成较大的近井摩阻,所以射孔方式对人工裂缝的起裂和延伸很关键。通常采用常规螺旋射孔方式,射孔孔眼只能垂直于井轴并在井壁上按相位均布排列,孔眼无法指向较易压开储层的裂隙方向、节理方向或主应力的方向。虽沿着水平井井筒方向形成裂缝,但受簇孔距小,孔间应力干扰及流体的重力指向等影响,致使簇间孔眼开启程度不一,扩展不充分,造成压裂难度大和改造体积受限<sup>[9]</sup>,进而影响单井产能。

平面周向射孔技术如图1、图2所示,在井筒周向设置3~4个孔眼,通过偏心装置将大口径射孔弹指向井筒周边(垂直方向+水平方向),从而在射孔后形成单一纵向主裂缝,既满足限流作用,又规避孔间及簇间裂缝的应力干扰,改善了近井地带主裂缝弯曲度和连通性,提高单簇、单孔进液量及净压力,使得多簇裂缝都能充分的扩展,从缝高、缝宽、复杂度和有效支撑等多个方面提高改造效果<sup>[10]</sup>。

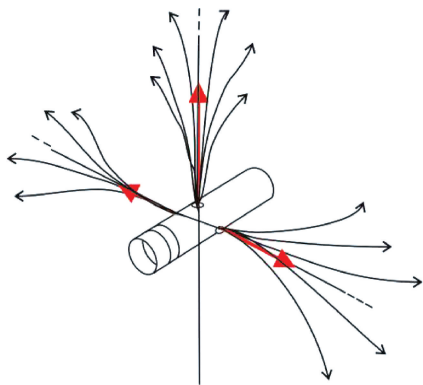


图 1 平面周向射孔(3 孔)示意图

Fig.1 Schematic diagram of plane circumferential perforation (3 holes)

利用该射孔方式在 DS106 水平井压裂中开展了试验(见表 1),其中 13 段采用平面周向射孔方式(单簇 3~4 孔),孔眼有效率 62.5%~100%,平

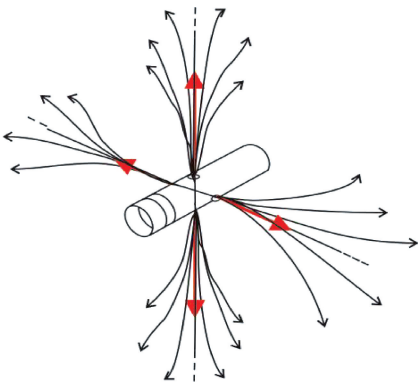


图 2 平面周向射孔(4 孔)示意图

Fig.2 Schematic diagram of plane circumferential perforation (4 holes)

表 1 DS106 井不同射孔方式孔眼有效率

Table 1 The perforation efficiency of DS106 well with different perforation methods

段	簇数	射孔方式	设计孔眼数/个	排量/ $\text{m}^3/\text{min}$	开启孔眼数/个	有效率/%
1 段	5	常规螺旋射孔,孔密 12 孔/ $\text{m}$ , $60^\circ$ 相位	30	6~10	18	60.0
2 段	8		24	8~12	18	75.0
3 段	8		24	8~12	24	100.0
4 段	6		18	8~12	13	72.2
5 段	6		18	8~12	15	83.3
6 段	7	平面周向射孔,孔径 12 mm,射孔方向为 3 方向	21	8~12	14	66.7
7 段	8	(水平+垂直向上)	24	8~12	24	100.0
8 段	8		24	8~12	24	100.0
9 段	8		24	8~12	17	70.8
10 段	6		18	8~12	18	100.0
11 段	8		24	8~10	15	62.5
12 段	8		24	6~10	18	75.0
13 段	8	常规螺旋射孔,孔密 10 孔/ $\text{m}$ , $60^\circ$ 相位	40	6~10	19	47.5
14 段	5	平面周向射孔方式,孔径 12 mm,射孔方向为 4	15	6~7	15	100.0
15 段	5	方向(水平+垂直)	15	6~7	14	93.3

3 大排量+高铺砂浓度加砂技术

理论上,提高施工排量可以提高缝内净压力,进而克服水平应力差以形成复杂裂缝<sup>[11-13]</sup>。依据(1)式进行理论计算,图 3 可以看出,排量和孔眼摩阻成正比关系,即孔眼摩阻随着施工排量的降低而降低,且加砂打磨孔眼增大的情况下,孔眼摩阻降低更明显。

为确保气井生产所需的裂缝长期导流能力,提高支撑剂用量,增加支撑剂铺置浓度,降低支撑剂嵌入及破碎对裂缝导流能力下降的影响是现场采用的行之有效的技术措施<sup>[14]</sup>。室内应用 FracproPT 软件模拟小排量低铺砂浓度和大排量高铺砂浓度的裂缝剖面(见图 4、图 5)。

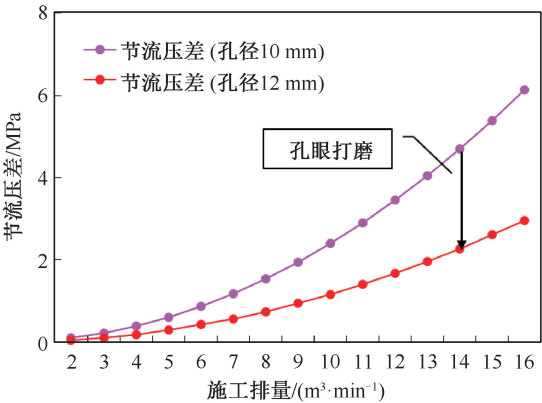


图 3 施工排量与节流压差关系曲线

Fig.3 Relationship curve between construction displacement and throttle pressure difference



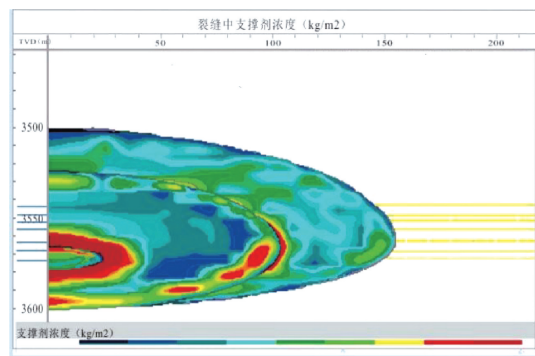


图4 小排量低铺砂浓度下裂缝剖面模拟图

Fig. 4 Fracture profile simulation diagram with small displacement and low sand-laying concentration

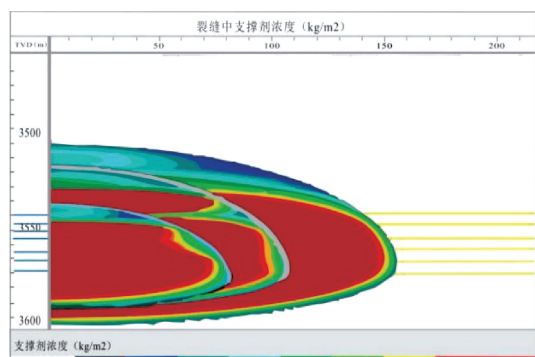


图5 大排量高铺砂浓度下裂缝剖面模拟图

Fig. 5 Fracture profile simulation diagram with large displacement and high sanding concentration

可以看出随着主加砂阶段排量( $5 \sim 8 \text{ m}^3/\text{min}$ )的提高,按常规加砂速度( $0.5 \sim 2.2 \text{ m}^3/\text{min}$ )加砂,导致砂比低、用液量增加,主缝导流能力降低;而大排量( $10 \sim 12 \text{ m}^3/\text{min}$ ) + 高铺砂浓度加砂( $150 \sim 850 \text{ kg}/\text{m}^2$ ),保证主缝导流,同时降低液体用量,减少伤害,降低施工成本。

## 4 典型井例

以 N57 井为例,该井位于松辽盆地南部德惠断陷中部的华家构造带,属于 DS101 井区,目的层为火石岭组,以凝灰岩为主,孔隙度  $8\% \sim 20\%$ 、渗透率  $0.01 \sim 0.1 \text{ mD}$ ,属低孔、超低渗透储层;脆性矿物含量平均为  $72.5\%$ ,黏土矿物含量平均为  $27.5\%$ ,泊松比为  $0.21$ ,杨氏模量为  $20.23 \text{ GPa}$ ,矿物脆性指数为  $61\%$ ,弹性力学脆性指数为  $44\%$ ,最小水平主应力  $31.2 \sim 35.7 \text{ MPa}$ ,两向应力差值为  $4 \sim 5 \text{ MPa}$ ,应力差异系数介于  $0.13 \sim 0.15$  之间。该井脆性指数高、水平主应力差值小且天然裂缝发育,具备缝网形成条件。

N57 井 A 点靶点位置  $2505 \text{ m}$ ,应力低(梯度  $0.0132 \text{ MPa}/\text{m}$ ),以“提产、控投”为目标,开展“密

切割+平面周向射孔+大排量高砂比加砂”水平井提高缝控体积压裂技术先导性试验。该井分 21 段 210 簇,平均段间距  $85.7 \text{ m}$ ,簇间距  $5.6 \text{ m}$ 。第 1 段 10 簇采用油管传输射孔,孔密  $12 \text{ 孔}/\text{m}$ ;第 2 段~第 21 段均采用  $12 \text{ mm}$  大孔径平面周向射孔,射孔方向 4 方向(水平+垂直);基于限流射孔+暂堵理论研究,优化施工排量、孔眼数,对于不能同时开启的簇,配合层间炮眼球暂堵 602 个,尽可能让所有簇有效开启。

首先造缝阶段,使用中-高排量( $8 \sim 10 \text{ m}^3/\text{min}$ )注入高黏度冻胶使人工裂缝沿着目的层长度方向延伸和扩展,形成足够长的单一主裂缝,减小近井裂缝的复杂程度;其次成网阶段,以形成的主裂缝为导流和导压通道,以大排量( $12 \sim 10 \text{ m}^3/\text{min}$ )注入低黏度滑溜水携砂段塞式加砂,在单一主裂缝附近横向造缝,促进远井区分支缝和微裂缝的形成,提高远井区裂缝的复杂程度;最后主加砂阶段,通过大排量( $10 \sim 12 \text{ m}^3/\text{min}$ )高黏度冻胶携带高铺砂浓度的多粒径组合( $40 \sim 70$  目石英砂+ $30 \sim 50$  目石英砂)对主裂缝进行支撑,不仅能够保证主缝导流,同时降低液体用量,减少伤害。

N57 井总用液量  $26766 \text{ m}^3$ ,总砂量  $2831 \text{ m}^3$ ,最高加砂速度  $3.8 \text{ m}^3/\text{min}$ ,最高砂比  $61\%$ ,见气返排率  $1.4\%$ ,最高获  $16.2 \times 10^4 \text{ m}^3$  高产气流,压后效果显著。

## 5 结论

(1)水平井提高缝控体积压裂技术是由多簇限流射孔、配合层间暂堵+平面周向射孔+大排量高砂比加砂技术组合而成。其中限流射孔和层间暂堵技术,能提高簇密度、控制孔眼数,实现多簇均匀开启;采用平面周向射孔技术,避免近井多裂缝的形成;大排量、高铺砂浓度加砂技术,确保了多簇裂缝均匀扩展,提高导流能力。

(2)2020 年吉林油田致密气现场开展 3 口水平井提高缝控体积压裂新技术试验,压后效果显著,是实现致密气效益开发的有效技术途径,为其它非常规资源高效动用和效益开发提供了借鉴。

**致谢:**感谢油气工程研究院同意本论文公开发表;感谢领导和同事们在论文撰写过程中提供的支持和帮助!

## 参考文献

[1] 王艳玲. 德惠断陷致密气藏直井高密度完井体积压裂技

- 术[J]. 油气井测试, 2020, 29(6): 55-61.
- WANG Yanling. High-density completion volume fracturing technology for vertical wells in tight gas reservoirs in Dehui fault depression [J]. Well Testing, 2020, 29(6): 55-61.
- [2] 于学亮, 胥云, 翁定为, 等. 页岩油藏“密切割”体积改造产能影响因素分析[J]. 西南石油大学(自然科学版), 2020, 42(3): 132-143.
- YU Xueliang, XU Yun, WENG Dingwei, et al. Factors influencing the productivity of the multi-fractured shale oil reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science&Technology Edition), 2020, 42(3): 132-143.
- [3] 朱海燕, 徐鑫勤, 钟安海, 等. 深层页岩油水平井密切割裂缝均衡扩展数值模拟—以胜利油田 YYP1 井为例[J]. 石油天然气地质, 2022, 43(1): 229-240.
- ZHU Haiyan, XU Xinqin, ZHONG Anhui, et al. Numerical simulation of evenly propagating hydraulic fractures with smaller cluster spacing in the horizontal well YYP1 for deep shale oil in the Shengli oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 229-240.
- [4] 吴奇, 胥云, 王晓泉, 等. 非常规油气藏体积改造技术—内涵、优化设计与实现[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 352-358.
- WU Qi, XU Yun, WANG Xiaoquan, et al. Volume fracturing technology of unconventional reservoirs: Connotation, optimization design and implementation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 352-358.
- [5] 任佳伟, 张先敏, 王贤君, 等. 致密砂岩油藏水平井密切割压裂改造参数优化[J]. 断块油气田, 2021, 28(6): 859-864.
- REN Jiawei, ZHANG Xianmin, WANG Xianjun, et al. Optimization of parameters of close cutting fracturing for horizontal well in tight sandstone reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(6): 859-864.
- [6] 范宇, 周小金, 曾波, 等. 密切割分段压裂工艺在深层页岩气 Zi-2 井的应用[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(2): 223-227.
- FAN Yu, ZHOU Xiaojin, ZENG Bo, et al. Application of intensive staged fracturing technology in deep shale gas well Zi-2 [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(2): 223-227.
- [7] KRAEMER C, LECERF B, TORRES J, et al. A novel completion method for sequenced fracturing in the Eagle Ford Shale [C]. SPE 169010, 2014.
- [8] 杨衍东, 刘林, 黄禹忠, 等. 国外分流暂堵宽带压裂新技术及其先导试验[J]. 中外能源, 2015, 26(10): 65-71.
- YANG Yandong, LIU Lin, HUANG Yuzhong, et al. New foreign broadband sequence sechnology for diversion and temporary plugging and its pilot test[J]. Sino-Global Energy, 2015, 26(10): 65-71.
- [9] 周再乐, 张广清, 熊文学, 等. 水平井限流压裂射孔参数优化[J]. 断块油气田, 2015, 22(3): 374-378.
- ZHOU Zaile, ZHANG Guangqing, XIONG Wenxue, et al. Perforating parameter optimization of limit entry fracturing for horizontal wells[J]. Fault-block Oil & Gas field, 2015, 22(3): 374-378.
- [10] 蒋廷学, 苏瑗, 卞晓冰, 等. 常压页岩气水平井低成本高密度缝网压裂技术研究[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(5): 78-83.
- JIANG Tingxue, SU Yuan, BIAN Xiaobing, et al. Network fracturing technology with low cost and high density for normal pressure shale gas [J]. Reseroir Evaluation and Development, 2019, 9(5): 78-83.
- [11] 曹学军, 王明贵, 康杰, 等. 四川盆地威荣区块深层页岩气水平井压裂改造工艺[J]. 天然气工业, 2019, 39(7): 81-87.
- CAO Xuejun, WANG Minggui, KANG Jie, et al. Fracturing technologies of deep shale gas horizontal wells in the Weirong Block, southern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(7): 81-87.
- [12] 孙晓明, 姜佩合, 周洪亮, 等. 榆树林油田缝网压裂工程因素分析[J]. 石油工业技术监督, 2019, 35(7): 1-3.
- SUN Xiaoming, JIANG Peihe, ZHOU Hongliang, et al. Factors analysis of fracture network fracturing engineering in Yushulin oilfield [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2019, 35(7): 1-3.
- [13] 张弢, 李文彬, 刘亭. 缝内转向技术在老井缝网压裂中的应用[J]. 钻采工艺, 2016, 39(4): 41-44.
- ZHANG Tao, LI Wenbin, LIU Ting. Application of fracturing turnaround technology in old wells crack network fracturing [J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(4): 41-44.
- [14] 郑有成, 范宇, 雍锐, 等. 页岩气密切割分段+高强度加砂压裂新工艺[J]. 天然气工业, 2019, 39(10): 76-81.
- ZHENG Youcheng, FAN Yu, YONG Rui, et al. A new fracturing technology of intensive stage + high-intensity proppant injection for shale gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(10): 76-81.

编辑 穆立婷

第一作者简介: 王艳玲, 女, 1985 年出生, 硕士, 工程师, 2014 年毕业于西南石油大学矿产普查与勘探专业, 现从事油气藏增产改造技术研究工作。电话: 15568695133; Email: wyl1613@163.com。通信地址: 吉林省松原市宁江区长宁北街 618 号, 邮政编码: 138000。