

低压裂缝性储层小型测试压裂改造技术

陈超峰¹, 朱雪华¹, 杨晓儒¹, 严康², 林铁林³

1. 中国石油股份公司新疆油田分公司勘探事业部 新疆克拉玛依 834000

2. 长江大学石油工程学院 湖北武汉 430100

3. 中国石油华北油田分公司开发事业部 河北任丘 062552

通讯作者: Email: yankang175000@163.com

项目支持: 中石油股份公司重点工程技术攻关项目“准噶尔盆地复杂岩性低渗储层试油(含储层改造)配套技术研究”(2018-FD-04)

引用: 陈超峰, 朱雪华, 杨晓儒, 等. 低压裂缝性储层小型测试压裂改造技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(4): 35-41.

Cite: CHEN Chaofeng, ZHU Xuehua, YANG Xiaoru *et al.* Small-scale test fracturing technology for low-pressure fractured reservoirs [J]. Well Testing, 2018, 27(4): 35-41.

摘要 针对准噶尔盆地西北缘车排子凸起石炭系存在的储层裂缝发育、地层压力低、压裂加砂困难、返排率低等问题, 基于储层高效开采目的, 以石炭系重点探井储层改造为研究对象, 开展综合前置液多段塞、前置液拌液氮增能及低密度支撑剂等工艺的小型测试压裂改造技术应用。CP13井现场应用研究表明, 在修正的地质模型、优选施工工艺、优化施工参数条件下, 经四段塞、11 m³连续泵入液氮、70/140目和30/50目陶粒等处理改造后, 该井日产油最高达26.16 m³, 日产气最高达0.382×10⁴ m³, 较改造前增产效果明显。小型测试压裂可以在类似低压裂缝性储层改造过程中推广应用以满足高效开发的生产需要。

关键词 低压; 裂缝性储层; 天然裂缝; 测试压裂; 多段塞; 泵入液氮; 低密度支撑剂

中图分类号: TE348 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.04.006

Small-scale test fracturing technology for low-pressure fractured reservoirs

CHEN Chaofeng¹, ZHU Xuehua¹, YANG Xiaoru¹, YAN Kang², LIN Tielin³

1. Department of Exploration, PetroChina, Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China

2. College of petroleum engineering, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China

3. Development Business Department, PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 062552, China

Abstract: The Carboniferous reservoirs of the Chepaizi bulge in the northwestern margin of the Junggar Basin are characterized by fracture development, low formation pressure, difficulty in fracturing and sanding, and low flowback rate. In order to efficiently exploit the reservoir, this paper takes the reservoir stimulation of the key exploration wells of the Carboniferous system as the research object and carries out the application test of the small-scale test fracturing stimulation technology. The fracturing technology integrates several technologies, such as the pad fluid multi-slug, energy increasing of mixed liquid nitrogen with pad fluid and low-density proppant. Field application show that under the modified geological model, the preferred construction process and the optimized construction parameters, the daily oil production of the well CP13 (This well uses a four slug, continuously pumping 11 m³ of liquid nitrogen, and also uses 70/140 mesh and 30/50 mesh ceramist) can reach up to 26.16 m³ and the daily gas production can reach up to 0.382×10⁴ m³, the stimulation effect is obvious. This fully demonstrates that small test fracturing can be applied in the stimulation process of the similar low-pressure fractured reservoirs to meet the production needs of efficient development.

Keywords: low pressure; fractured reservoir; natural fracture; test fracturing; multi-slug; liquid nitrogen injection; low density proppant

近年来,随着准噶尔盆地勘探开发进程的不断加快,勘探开发逐渐向着复杂难动用领域深入。油气井储层改造的难度不断增大,储层改造工艺技术面临着诸多严峻挑战^[1]。西北缘车排子凸起石炭系为典型的低压裂缝性储层,即地层压力低、天然

裂缝发育。低压裂缝性储层改造难点集中表现在,低压地层在常规压裂液体作用下返排困难,返排率低,其中残留的压裂液对储层极易造成伤害,降低压后产能^[2];天然裂缝发育使得压裂液滤失量大,压裂效率低,加砂困难,极易砂堵^[3]。

自1947年世界首口压裂井在美国 Hugoton 气田 Kelpperl 井成功压裂^[4],至今已有超过百万井次压裂作业。水力压裂技术逐渐发展成为一项高度成熟的采油气工艺技术。据统计,我国剩余的 799×10^8 t 石油资源量中,有60%的低渗透石油资源,剩余的 49.6×10^{12} m³ 天然气中,约51%为低渗透天然气资源^[5]。目前我国低渗透油气藏探明储量约 60×10^8 t^[6],但是由于致密油气藏低孔、低渗、低压特性,使得低渗透储量产能低,达不到工业经济开采效益^[7],需要通过对油井压裂增产,达到油田增产稳产效果。国内外主要储层压裂工艺有水平井分段压裂技术^[8]、直井多层分压技术^[9]、重复压裂工艺技术^[10-12]、致密油高效吸压裂技术^[13]和无水压裂工艺技术^[14]。

西北缘车排子凸起石炭系火山岩储层、沉积岩储层均十分发育,其主力油藏发育在石炭系莫老坝组(C_2m)和太勒古拉组(C_1t),油藏埋深2 000.0~3 000.0 m,储层厚度较大,油层不连续、厚度变化大。CP13井主探目的层为 C_1t ,待改造目的层深度2 118.0~2 126.0 m。该储层岩性主要是安山岩、火山角砾岩、凝灰岩,岩石密度2.36 g/cm³。经储层常规岩心分析,有效孔隙度8.4%~22.9%,平均11.77%,渗透率小于 $0.01 \times 10^{-3} \sim 22.5 \times 10^{-3}$ μm^2 ,平均 2.08×10^{-3} μm^2 ,说明 C_1t 地层天然裂缝较发育,属于中低孔、低渗储层,储集层地温梯度2.97 °C/100 m,地层压力梯度0.009 MPa/m,属于正常温度、异常低压系统。

根据车排子凸起石炭系储层特点,通过探索研究,在小型测试压裂基础上,提出前置液拌液氮补充地层能量,加快压裂液返排速度和提高压裂液返排率,降低对地层的污染^[15-16],同时采用前置液多段塞^[17-18]及低密度支撑剂^[19]等技术实现封堵天然裂缝、优化缝内支撑剂纵向和纵深的铺置,确保施工安全及后期增产效果。

1 工艺优选及参数优化

对于天然裂缝较发育的储层,采用前置液多段塞、伴液氮技术和低密度陶粒支撑综合运用,一方面,有效避免压裂施工过程中液体的大量滤失和主裂缝造缝不明显,增加施工难度;另一方面,低密陶粒实现的纵向和纵深铺置为油层提供有效的导流通道。

1.1 前置液多段塞

根据测试压裂参数总结分析,前置液多段塞是经济、有效降低多裂缝不利因素的重要方

法^[20-23,25-26]。段塞浓度过低,起不到好的打磨孔眼、降滤失的效果;浓度过高又会引起早期砂堵^[15]。经研究和现场应用情况表明,前置液段塞浓度应控制在5%~10%的范围内。在CP13井 C_1t 当中,前置液采用四个段塞,具体施工参数见表1。

表1 CP13井 C_1t 前置液段塞施工参数
Table 1 Slug construction parameters of C_1t pad liquid in well CP13

段塞序号	施工排量 /(m ³ ·min ⁻¹)	浓度 /(kg·m ⁻³)	加砂量 /m ³
1	5.13	50	0.38
2	5.13	70	1.15
3	5.13	90	2.80
4	5.13	110	3.60

1.2 前置液伴液氮增能

储层所含能量,严重影响压裂改造的成败和有效期的长短^[24]。在CP13井主探目的层压力不足、天然裂缝发育、前期储层改造发生砂堵的情况下,在前置液阶段混注液氮,增加返排能量,减少储层污染^[26],同时对压裂液起到增黏、降滤、提高压后返排率的作用,改善压裂效果。

泵注压力平稳后,在确保安全施工的前提下,液氮车以设计排量(≤ 200 L/min)连续注液氮11.0 m³。从施工和排液效果看,前置液伴液氮有效降低施工滤失、提高排液效果,压裂后液体的返排正常,能有效减少压裂液对储层的伤害。

1.3 低密度支撑剂

在压裂过程中,由于重力作用会使支撑剂无法避免地向下沉降,其中支撑剂的沉降速度与流体黏度、速度、支撑剂密度有关^[27]。流体黏度越低、速度越小、支撑剂密度越大,支撑剂沉降速度越快^[28]。低孔、低渗或特低渗储层,裂缝闭合慢,在裂缝闭合过程中,液体黏度下降,流体速度减小,支撑剂更倾向于向下沉降,导致改造的目的层上部裂缝导流能力损失。

低密度支撑剂,即在同等承压条件下,体积密度一般小于常规中密支撑剂密度的15%。采用低密度支撑剂,可有效减缓支撑剂沉降速度,形成更加合理的裂缝纵向铺砂剖面,使得储层上部裂缝导流能力得到保证,如图1所示。

1.4 关键参数优化

研究表明,施工排量根据支撑剂沉降、井口限压、地层滤失、裂缝纵向延伸情况来选择^[29]。在相同储层条件下,施工排量过低,存在滤失大、造缝率低,易诱发早期砂堵等问题;施工排量过高,存在多裂缝易开启、缝高失控等问题^[30]。

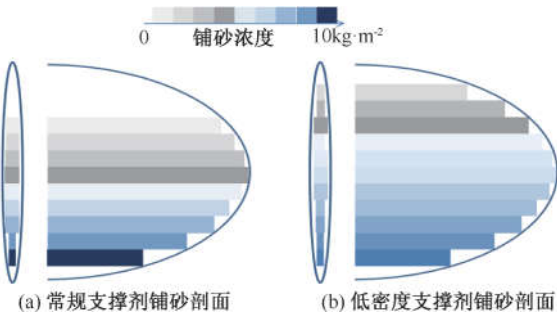


图 1 常规支撑剂与低密度支撑剂对比剖面示意图
Fig.1 Cross-sectional schematic view of conventional proppant and low-density proppant

由于 CP13 井区压裂液效率较低,通过提高排量来平衡滤失,优选最小施工排量 $5.00 \text{ m}^3/\text{min}$ 。为保证工艺成功,采用较低砂比和较小支撑剂进行施工:平均砂比控制在 15%,最大加砂浓度控制在 $300 \text{ kg}/\text{m}^3$;采用 70/140 目作为前置段塞降滤、采用 30/50 目陶粒作为主支撑剂。

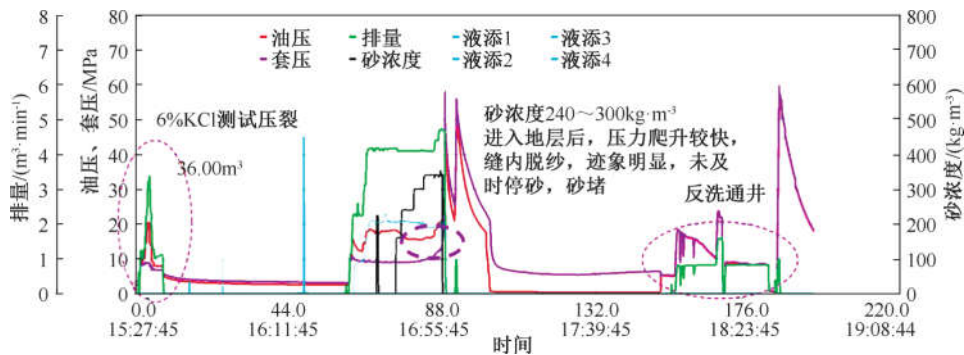


图 2 小型测试压裂施工曲线
Fig.2 Construction curve for small scale test fracturing

经压裂测试,本井地面停泵压力 5.81 MPa ,停泵压力梯度 $0.0128 \text{ MPa}/\text{m}$,井下停泵压力 27.1 MPa 。设计排量是 $4.0 \text{ m}^3/\text{min}$ 时,前置液阶段井口施工压力预计最高可达 34.17 MPa ,实际施工压力为油压 18.6 MPa ,套压 9.2 MPa 。设计与实际相差 15 MPa 左右,闭合应力较预测低。

停泵过程中压力曲线表现出“水击效应”。从岩心及停泵水击效应可以看出(图 3),储层岩石较致密、天然裂缝发育,其中天然裂缝发育是造成滤失大、砂堵、加砂困难的重要因素。

通过 G 函数分析可知(图 4),井底闭合应力为 25.77 MPa ,闭合时间较短为 3.6 min ,隐含的携砂液效率为 29%,压裂液效率不高,净压力估算值 1.33 MPa 。G 函数呈现出裂缝开启及裂缝高度均失控的特征。近井阶梯降磨阻分析(图 5)得近井筒摩阻为

2 小型测试压裂研究与应用

通过小型测试压裂获取地层破裂压力、延伸压力、闭合情况、液体效率和摩阻等参数,为主压裂施工设计及方案调整提供依据^[31-33]。

鉴于对储层施工难度的分析,通过阶梯升降排量进行小型压裂测试^[34]。为进一步认识地层加砂难度,在 $2118.0 \sim 2126.0 \text{ m}$ 小型测试压裂后采用冻胶小规模加砂作业。测试压裂过程中注入 36.00 m^3 的 6% KCl 水溶液,小规模加砂压裂施工排量 $4.0 \text{ m}^3/\text{min}$,总用水基胍胶压裂液 112.60 m^3 ,其中前置液 45.00 m^3 ,携砂液 57.00 m^3 ,加粒径 $0.45 \sim 0.90 \text{ mm}$ 的低密度陶粒 9.10 m^3 ,加砂比 15.96%,顶替液 10.60 m^3 ,在砂浓度为 $240 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的支撑剂进入地层后,压力爬升较快,缝内脱砂迹象明显,出现地层砂堵。施工曲线如图 2 所示。

2.8 MPa ,相对较高。

净压力拟合后,反演加砂裂缝形态、裂缝高度不受控,与上下无应力隔层及后期缝内脱砂情况相符合,平均缝宽 0.598 cm ,相对缝宽较小,易造成砂堵(图 6)。

通过对小型测试压裂及小规模加砂测试压裂的深入分析,对主体压裂进一步优化,决定采取如下应对措施:

- (1) 提高液体黏度,增加前置液段塞个数,降低滤失,解决天然裂缝发育情况。
- (2) 提高前置液比例到 50%,充分造缝;增大施工排量至 5.0 m^3 ,增加缝内净压力、缝宽,保证加砂安全。
- (3) 通过前置液氮增能降滤作用,降低施工砂堵风险,优化施工排量为 $200 \text{ L}/\text{min}$ 。

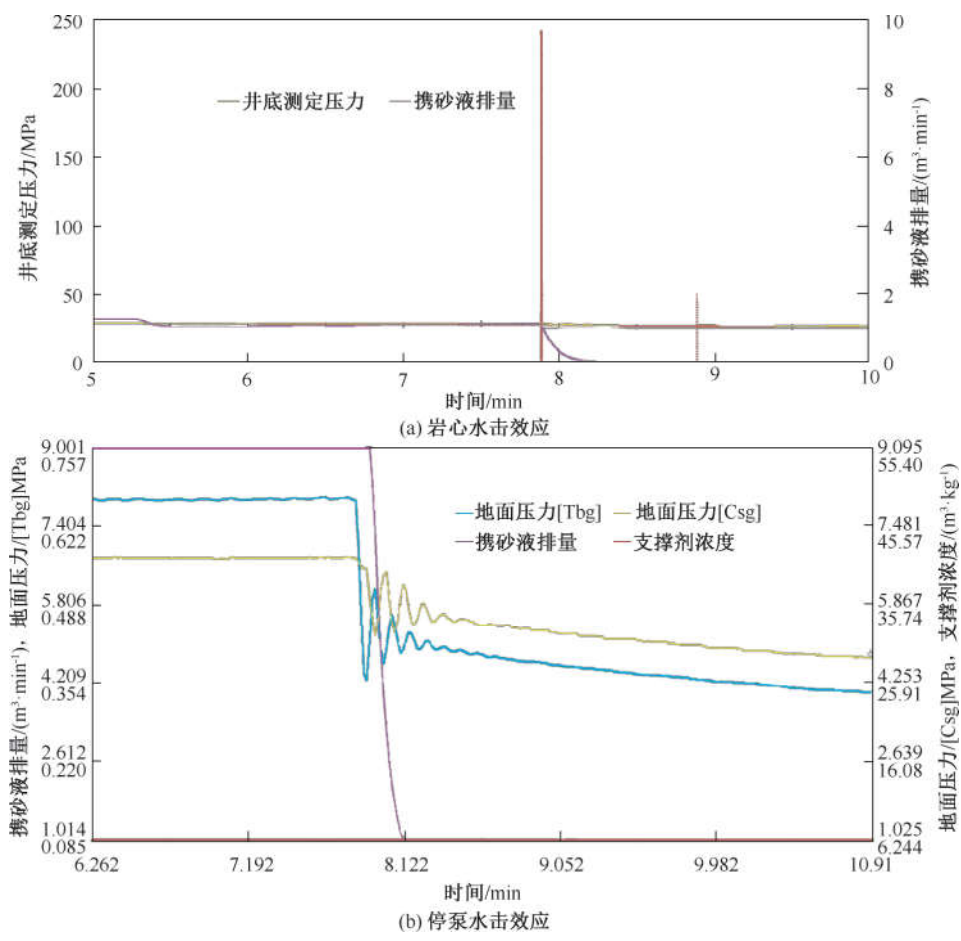


图 3 CP13 井 2 118.0~2 126.0 m 压裂停泵压力曲线
Fig.3 Pressure curve after stopping of pump at 2 118.0~2 126.0 m of well CP13

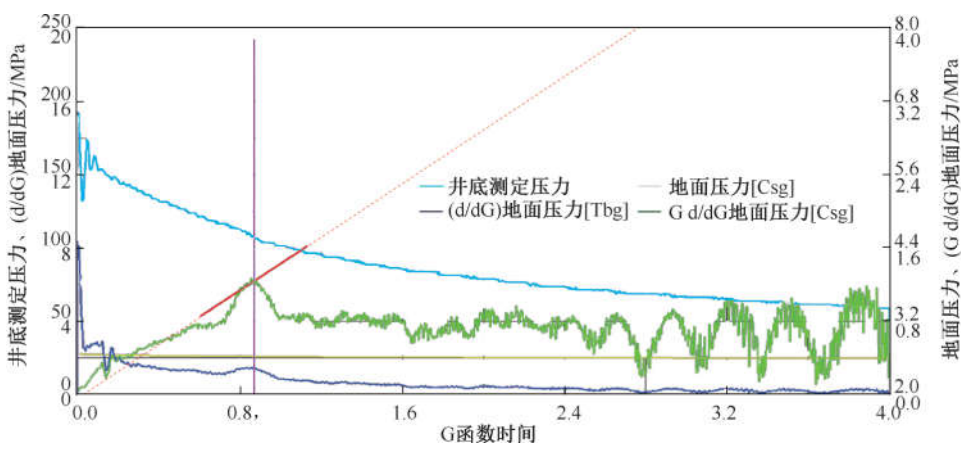


图 4 测试压裂 G 函数分析曲线
Fig.4 G-function analysis curve for testing fracturing

(4)控制加砂浓度,降低最高砂比,使用组合粒径支撑剂,即采用 70/140 目和 30/50 目的陶粒。CP13 井 C₁t 中 2 118.0~2 126.0 m 成功实施上述综合改造,克服了该井区石炭系储层改造难题。

(5)压裂改造中,施工排量 5.0 m³/min,入井水基胍胶压裂液 614.0 m³,平均砂比 13.7%,最高加砂比 17.6%,加砂 44 m³(70/140 目陶粒 4 m³,30/50 目陶粒 40 m³),最高井口施工压力 26 MPa。

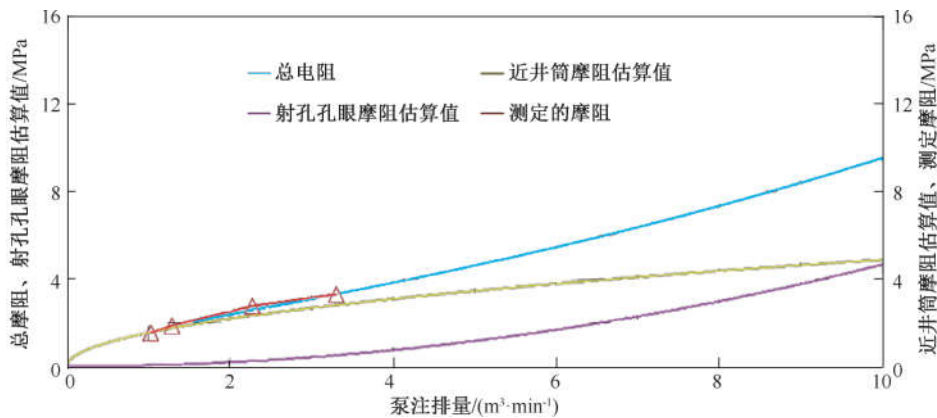


图 5 阶梯降摩阻分析曲线
Fig.5 Step-down friction analysis curve

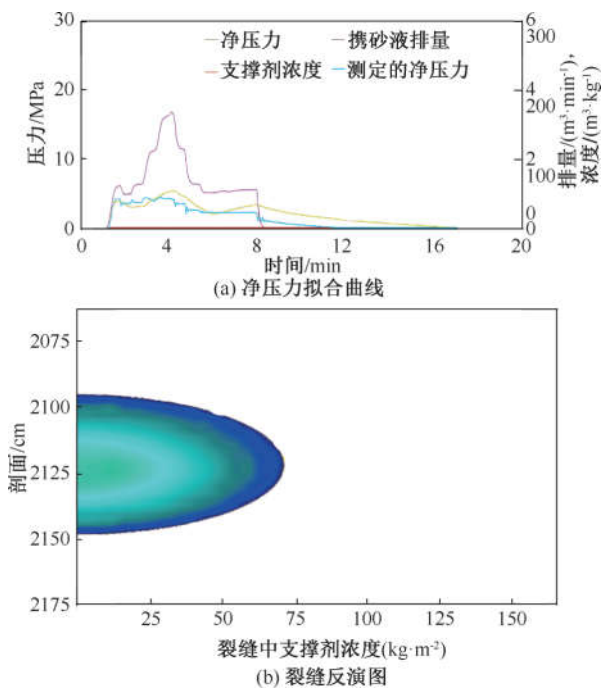


图 6 CP13 井 2118.0~2126.0 m 压裂净压力拟合及裂缝反演图

Fig.6 Net pressure fitting and fracture inversion of fracturing at 2 118.0~2 126.0 m in well CP13

通过上述措施,安全顺利完成主体压裂施工。采用 5.0 mm 油嘴进行试产,获油压 2.4~2.3 MPa、套压 9.8~9.5 MPa、日产油 16.18 m³,最高日产油达 26.16 m³,累产油 215.68 m³,取得了明显的增产效果。

3 结论

(1)小型测试压裂着重考虑压裂规模、施工排量和加砂难易程度。前置液多段塞、前置液伴液氮和低密度陶粒支撑等技术能有效解决储层低压、天然裂缝发育所引发的液体滤失和支撑剂优化铺置问题。

(2)前置液多段塞能实现天然裂缝储层的有效暂堵,有利于主裂缝的延展、所造裂缝更长、改造效果更好,降低了地层压裂施工难度。

(3)前置液伴液氮在低压裂缝储层中可以起到降滤增能作用,既降低施工难度又提高压后返排率。

(4)低密度陶粒在裂缝中的有效铺置,为改造效果提供保障。

(5)合理选择施工排量、砂比和支撑剂粒径等参数,对施工工艺的成败及压裂裂缝的延展、支撑、缝高控制等起着重要的作用。

致谢:本文写作过程中,得到中石油股份公司重点工程技术攻关项目“准噶尔盆地复杂岩性低渗储层试油(含储层改造)配套技术研究”项目组相关技术人员大力支持,在此表示感谢。

参考文献

[1] 孙海成,汤达桢,蒋廷学,等.页岩气储层压裂改造技术[J].油气地质与采收率,2011,18(4):90-93,97.
SUN Haicheng, TANG Dazhen, JIANG Tingxue *et al.* Shale gas reservoir fracturing technology [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(4): 90-93, 97.
[2] 刁素,任山,黄禹忠,等.压裂井高效返排技术在川西地区的先导性试验[J].天然气工业,2008,28(9):89-91.
DIAO Su, REN Shan, HUANG Yuzhong *et al.* Pilot tests on fracturing wells flowback technology in high efficiency in West Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(9): 89-91.
[3] 王艳芬,孔丽娜,成一,等.裂缝性地层压裂降滤失技术应用研究[J].钻井液与完井液,2013,30(5):71-74.
WANG Yanfen, KONG Lina, CHENG Yi *et al.* Study on application of fractured layered cracking and filtration technology [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2013, 30(5): 71-74.
[4] 王晓泉,陈作,姚飞.水力压裂技术现状及发展展望

- [J]. 钻采工艺, 1998, 21(2): 28-32.
- WANG Xiaoquan, CHEN Zuo, YAO Fei. The present situation and prospects of hydraulic fracturing technology [J]. *Drilling & Production Technology*, 1998, 21(2): 28-32.
- [5] 胡文瑞. 中国低渗透油气的现状与未来[J]. *中国工程科学*, 2009(6): 53-55.
- HU Wenrui. The present and future of low permeability oil and gas in China [J]. *Engineering Science*, 2009(6): 53-55.
- [6] 段文广, 李晓军. 国内外水平井分段压裂技术现状[J]. *现代制造技术与装备*, 2012(3): 55-57.
- DUAN Wenguang, LI Xiaojun. Horizontal well at home and abroad staged fracturing technology status [J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2012(3): 55-57.
- [7] 杨航宇, 杜敬国. 压裂工艺技术现状及新进展[J]. *兰州石化职业技术学院学报*, 2017, 17(2): 1-4.
- YANG Hangyu, DU Jingguo. Current situation and new progress of fracturing technology [J]. *Journal of Lanzhou Petrochemical Vocational College of Technology*, 2017, 17(2): 1-4.
- [8] 陈建军, 翁定为. 中石油非常规储层水平井压裂技术进步[J]. *天然气工业*, 2017, 37(9): 79-84.
- CHEN Jianjun, WENG Dingwei. CNPC's progress in horizontal well fracturing technologies for unconventional reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(9): 79-84.
- [9] 胡文瑞, 魏漪, 鲍敬伟. 中国低渗透油气藏开发理论与技术进展[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(4): 646-656.
- HU Wenrui, WEI Yi, BAO Jingwei. Development of the theory and technology for low permeability reservoirs in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(4): 646-656.
- [10] 刘子雄, 李敬松, 黄子俊, 等. 低渗透储层重复压裂有效增产方法研究[J]. *吐哈油气*, 2012, 17(4): 341-343.
- LIU Zixiong, LI Jingsong, HUANG Zijun *et al.* Effective stimulation method for refracturing in low-permeability reservoirs [J]. *Tuha Oil & Gas*, 2012, 17(4): 341-343.
- [11] 王凤江, 丁云宏, 路勇. 低渗透油田重复压裂技术研究[J]. *石油勘探与开发*, 1999, 26(1): 71-73.
- WANG Fengjiang, DING Yunhong, LU Yong. Refracturing techniques for low permeability oil fields [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1999, 26(1): 71-73.
- [12] 姜梅枝. 低渗透重复压裂井选层研究[J]. *油气井测试*, 2012, 21(2): 37-40, 43.
- JIANG Meizhi. Solving controlled reserve by a single well and discharge radial under the condition of the gas well without closing well [J]. *Well Testing*, 2012, 21(2): 37-40, 43.
- [13] 周万富, 王鑫, 卢祥国, 等. 致密油储层动态渗吸采油效果及其影响因素[J]. *大庆石油地质与开发*, 2017, 36(3): 148-155.
- ZHOU Wanfu, WANG Xin, LU Xiangguo *et al.* Effects of the dynamic imbibition recovery and its influencing factors for the tight oil reservoirs [J]. *Petroleum Geology & Oil-field Development in Daqing*, 2017, 36(3): 148-155.
- [14] 康一平. 国内外无水压裂技术研究现状与发展趋势[J]. *石化技术*, 2016, 23(4): 73-74.
- KANG Yiping. Current situation and perspective of waterless fracturing technology [J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2016, 23(4): 73-74.
- [15] 张绍彬, 谭明文, 张朝举, 等. 实现快速排液的纤维增强压裂工艺现场应用研究[J]. *天然气工业*, 2005(11): 53-55.
- ZHANG Shaobin, TAN Mingwen, ZHANG Chaojun *et al.* Field application of fracturing technique with fiber enhanced proppant to rapidly flow back [J]. *Natural Gas Industry*, 2005(11): 53-55.
- [16] 孔令飞, 张冬霞, 刘长印, 等. 刘庄、胡状集油区压裂新技术研究与应用[J]. *特种油气藏*, 2005, 12(1): 63-65, 69.
- KONN Lingfei, ZHANG Dongxia, LIU CHANGyin *et al.* Study and application of new fracturing technology in Liuzhuang and Huzhuangji oil province [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2005, 12(1): 63-65, 69.
- [17] 卢云霄, 郭建春. 段塞式加砂技术在页岩气缝网压裂中的应用[J]. *油气井测试*, 2014, 23(5): 67-69.
- LU Yunxiao, GUO Jianchun. Application of slug-style sand fracture technology in seam net fracturing of shale gas [J]. *Well Testing*, 2014, 23(5): 67-69.
- [18] 刘淑芬, 杨景海, 李道伦, 等. 多段压裂水平井裂缝数及渗透率敏感性分析[J]. *油气井测试*, 2017, 26(5): 6-12, 75.
- LIU Sufen, YANG Jinghai, LI Daolun *et al.* Sensitivity analysis of fracture number and permeability for hydraulic fractured horizontal well [J]. *Well Testing*, 2017, 26(5): 6-12, 75.
- [19] 党建锋, 刘建伟. 西峡沟稠油油藏压裂改造技术研究与应用[J]. *吐哈油气*, 2010, 15(1): 56-59.
- DANG Jianfeng, LIU Jianwei. Study and application of fracturing stimulation technology for heavy oil reservoir in Block Xixiagou [J]. *Tuha Oil & Gas*, 2010, 15(1): 56-59.
- [20] CLEARY P M, JOHNSON E D, KOGSBEIL H H *et al.* Field implementation of proppant slugs to avoid premature screen-out of hydraulic fractures with adequate proppant concentration [C]. SPE 25892, 1993.
- [21] WEIJERS L, WRIGHT A C, SUGIYAMA H *et al.* Simultaneous propagation of multiple hydraulic fracture-evidence, impact and modeling implications [C]. SPE 64772, 2000.
- [22] MCDANIEL W B, MCMECHAN E D, STEGENT N A *et al.* Proper use of proppant slugs and viscous gel slugs can improve proppant placement during hydraulic fracturing applications [C]. SPE 71661, 2001.
- [23] 安耀清, 景宏勃, 王春芳, 等. 火山岩油藏压裂改造技术研究与应用[J]. *油气井测试*, 2008, 17(6): 65-66.
- AN Yaoqing, JING Hongbo, WANG Chunfang *et al.*

- Study on fracturing tech in volcanic rock pool and its application [J]. *Well Testing*, 2008, 17(6): 65–66.
- [24] 乔福友. 乌南油田油基压裂工艺研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
- QIAO Fuyou. Study on oil-based fracturing technology in Wunan oilfield [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.
- [25] 王安培, 兑爱玲, 蔡树行, 等. 长井段深层致密凝析气藏多段压裂工艺技术[J]. *钻采工艺*, 2013, 36(3): 49–51.
- WANG Anpei, DUI Ailing, CAI Shuxing *et al.* Staged fracturing technology in long lateral segment of tight condensate gas reservoir [J]. *Drilling & Production Technology*, 2013, 36(3): 49–51.
- [26] 张庆云, 蒙炯. 混氮气酸化压裂技术研究[J]. *科技视野*, 2007(33): 359–360.
- ZHANG Qinyun, MENG Jiong. Study on acidizing fracturing technology of mixed nitrogen [J]. *Science & Technology Information*, 2007(33): 359–360.
- [27] 宋景运. 煤层气井压裂液和支撑剂[J]. *探矿工程*, 1996(6): 55–57.
- SONG Jingyuan. CBM well fracturing fluid and propping agent [J]. *Exploration Engineering*, 1996(6): 55–57.
- [28] 李小龙, 肖雯, 王凯, 等. 支撑剂在清洁压裂液中的沉降规律[J]. *大庆石油地质与开发*, 2015, 34(2): 95–98.
- LI Xiaolong, XIAO Wen, WANG Kai *et al.* Setting laws of the proppant in ves fracturing fluid [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2015, 34(2): 95–98.
- [29] 刘方志. 裂缝性储层压裂技术研究与应用[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2012, 11(1): 74–75.
- LIU Fangzhi. Research and application of fractured reservoir fracturing technology [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2012, 11(1): 74–75.
- [30] 张义, 鲜保安, 孙粉锦, 等. 煤层气低产井低产原因及增产改造技术[J]. *天然气工业*, 2010, 30(6): 55–59.
- ZHANG Yi, XIAN Baoan, SUN Fenjin *et al.* Reason analysis and stimulation measures of low coalbed methane gas production wells [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(6): 55–59.
- [31] 黄琼冰, 鹿天柱, 寇永强, 等. 小型压裂技术的应用[J]. *油气井测试*, 1998, 7(2): 59–63.
- HUANG Qiongbing, LU Tianxhu, KOU Yongqiang *et al.* Application of small scale fracturing technology [J]. *Well Testing*, 1998, 7(2): 59–63.
- [32] 王海涛. 页岩气探井测试压裂方案设计与评价[J]. *石油钻探技术*, 2012, 40(1): 12–16.
- WANG Haitao. Design and evaluation of mini-frac scheme in shale gas exploration well [J]. *Petroleum Drilling Technique*, 2012, 40(1): 12–16.
- [33] 郑维师, 邹鸿江, 周然, 等. 超深高压裂缝性储层加砂压裂技术研究[J]. *油气井测试*, 2015, 24(4): 43–46.
- ZHENG Weishi, ZOU Hongjiang, ZHOU Ran *et al.* Proppant fracturing technology research of ultra-deep high pressure fractured reservoir [J]. *Well Testing*, 2015, 24(4): 43–46.
- [34] 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.

编辑 刘振庆

第一作者简介:陈超峰,男,1971年出生,高级工程师,1996年毕业于石油大学(华东)石油工程专业,主要从事试油技术管理及现场监督工作。电话:0990-6882413,18999503075;Email:yf2015@petrochina.com.cn。通信地址:新疆维吾尔自治区克拉玛依市克拉玛依区迎宾大道66号新疆油田公司机关2号楼勘探事业部,邮政编码:834000。