

海上低渗储层精细分层压裂技术及应用

徐延涛^{1,2}, 郭布民^{1,2}, 张雯^{1,2}, 王绪性^{1,2}, 曲喜墨^{1,2}, 刘子雄^{1,2}

1. 中海油田服务股份有限公司油田生产事业部 天津 300459

2. 天津市海洋石油难动用储量开采企业重点实验室 天津 300459

通讯作者: Email: xuyt4@cosl.com.cn

项目支持: 中国海洋石油集团有限公司“十四五”科技重大专项“海上低渗透及潜山油气田有效开发技术”(KJGG2022)

引用: 徐延涛, 郭布民, 张雯, 等. 海上低渗储层精细分层压裂技术及应用[J]. 油气井测试, 2024, 33(6): 36-41.

Cite: XU Yantao, GUO Bumin, ZHANG Wen, et al. Fine layered fracturing technology and its application in offshore low-permeability reservoirs [J]. Well Testing, 2024, 33(6): 36-41.

摘要 海上低渗、特低渗储层具有埋藏深、跨度大、薄互层发育、井斜大、射孔段长等特点, 常规笼统压裂方式对厚储层纵向改造不充分, 产能释放不彻底。提出了以“机械封隔硬分层+暂堵转向软分层”为核心的精细分层压裂技术, 将钻井工程参数与录井全烃分析相结合, 形成了一套海上低渗储层地质工程甜点预测方法, 实现储层纵向甜点识别及压裂层位划分; 通过管柱优化设计, 形成了多封隔器投球滑套、封隔器+桥塞分层为主的机械硬分层技术; 通过优选暂堵球及暂堵优化设计, 形成了低、中、高温系列暂堵球为主的暂堵转向软分层技术。该技术现场应用17口井, 实现了纵向储层有效改造, 增产效果显著, 为海上低渗、特低渗储层有效开发提供了技术支撑。

关键词 海上油田; 低渗储层; 精细分层压裂; 长射孔段; 甜点识别; 暂堵转向; 地质工程一体化

中图分类号: TE53 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.06.006

Fine layered fracturing technology and its application in offshore low-permeability reservoirs

XU Yantao^{1,2}, GUO Bumin^{1,2}, ZHANG Wen^{1,2}, WANG Xuxing^{1,2}, QU Ximo^{1,2}, LIU Zixiong^{1,2}

1. Production Optimization Business Division of COSL, Tianjin 300459, China

2. Tianjin Offshore Oil Reserves Exploitation Enterprise Key Laboratory, Tianjin 300459, China

Abstract: Offshore low-permeability and ultra-low-permeability reservoirs are characterized by deep burial, large span, development of thin interlayers, high wellbore inclination, and long perforation intervals. Conventional fracturing methods are insufficient for the longitudinal stimulation of thick reservoirs, resulting in incomplete productivity release. A fine layered fracturing technology centered around “mechanical isolation with hard layering + temporary plugging and diversion with soft layering” was proposed. By combining drilling engineering parameters with well logging total hydrocarbon analysis, a set of methods for predicting geological engineering sweet spots in offshore low-permeability reservoirs was developed, enabling the identification of vertical sweet spots and the division of fracturing layers. Through optimizing the tubing design, a mechanical hard layering technique primarily based on multiple packers and ball-drop sliding sleeves, as well as packer + bridge plug layering, was established. Additionally, by optimizing temporary plugging balls and designs, a temporary plugging diversion soft layering technology based on a series of low, medium and high temperature temporary blocking balls was formed. This technology was then applied in 17 wells, achieving effective vertical reservoir stimulation and significant production enhancement. providing essential technical support for the effective development of offshore low-and ultra-low-permeability reservoirs.

Keywords: offshore oilfield; low-permeability reservoir; fine layered fracturing; long perforation interval; sweet spot identification; temporary plugging diversion; geology-engineering integration

我国海上低渗原油探明地质储量近 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、天然气探明地质储量近 $5 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 资源量及开发前景巨大, 是常规油气的重要接替资源^[1-2], 海上低渗油田的高效开采已成为海洋油气增储上产的重要方向; 王万鹏等^[3] 针对海上低渗储层分层压裂管柱

遇卡的问题, 开展了原因分析, 为后续海上采用不动管柱一趟多层压裂管柱的推广应用提供借鉴; 刘义刚^[4] 系统总结了海上低渗压裂开采技术体系, 并针对渤海低渗储层纵向层系多、缝高延伸限的特点, 提出了防砂卡精细分层压裂技术, 采用非旋转

封隔器+逐层填砂方式解决了大斜度井分层压裂易砂卡管柱问题,但该技术压后需拖动管柱并填砂,不适用于高压井且效率不高;路智勇^[5]、周福建等^[6]、吴国涛等^[7]系统总结了国内外暂堵转向技术发展历程及研究进展,认为暂堵转向压裂是非常规油气田开发的重要增产改造手段之一;王博^[8]、郭建春等^[9]揭示了暂堵材料运移及封堵力学机理,为暂堵压裂技术应用提供了理论基础;徐国伟等^[10]根据博孜区块储层特点,采用纤维暂堵转向分层工艺,实现了博孜区块超深储层分层改造,为海上低渗储层分层压裂改造提供了借鉴。

海上低渗储层^[11]近年来开发下探5~20 mD低渗油藏,该类油藏跨度大(部分储层跨度可达95 m),薄互层发育;且井斜大(部分井的最大井斜可达89.45°),射孔段长,常规笼统压裂改造不充分,纵向动用程度差。针对上述问题,提出了一套精细分层压裂技术,首先,建立了一套地质工程一体化甜点评价方法,实现纵向甜点识别;然后,在储层划分基础上,采用“机械封隔分层+暂堵转向软分层”工艺实现了储层纵向精细分层改造,大幅度改善了压后效果,推动了海上低渗储层经济有效开发。

1 地质工程一体化甜点识别

海上低渗储层厚度大,非均质性强并且射孔段长,找到纵向储层上的优质甜点,对其进行改造可以获得更好的产能。将钻时与录井全烃相结合,形成了地质工程一体化甜点预测方法,对储层纵向甜点进行识别;同时结合压裂裂缝高度控制影响因素分析,进行储层段划分,既满足储层纵向甜点均匀改造,又保障了裂缝高度控制在储层段,避免压裂穿层造成砂卡管柱等井下事故。

1.1 甜点识别

为了能够识别出甜点位置,需要对各项参数进行分析,找出关联度最高的参数建立计算方程。通过各项参数关联度计算,结果表明钻时和全烃与甜点位置的关联度最高^[12]。钻时能够真实反映岩石强度、天然裂缝、脆性矿物、渗透率等,既反映了地质特性,更反映了工程特性,将钻时与结合录井全烃所反映的储层地质甜点相结合,建立了地质工程一体化的甜点预测方法。

由于不同井的钻井参数不同,在表征甜点时采用背景值之比,消除录井的环境差异,保证计算式

的通用性。

$$K_{tr} = \exp\left(0.71g\left(\frac{R}{R_0} - 1\right) + 0.21g\left(\frac{T_g}{T_{g0}} - 10\right)\right) \quad (1)$$

式中: K_{tr} 为甜点识别参数; R 、 R_0 分别为邻近非储层段的钻时和砂岩段的钻时基线值; T_g 、 T_{g0} 分别为砂岩段全烃最大值和邻近非储层段的全烃基线值。

利用公式(1)计算储层的 K_{tr} 值综合反映了储层的工程属性以及地质属性,可以更加真实的反映出地层甜点,选取 K_{tr} 值大的层段进行压裂改造,可以获得更好的压后产能。

1.2 压裂层段划分

海上低渗储层主力层位厚度大,射孔段长,压裂层位划分及裂缝高度控制难度较大。综合考虑储层厚度、隔层厚度、储隔层应力差等地质因素,结合施工排量及加砂规模优化,通过数值模拟方法研究了隔层厚度、储隔层自然伽马差对裂缝高度的影响,并结合裂缝监测及现场施工数据,建立了压裂层位划分图版:泥岩隔层厚度大于5 m、储隔层伽马差值大于15,见图1。

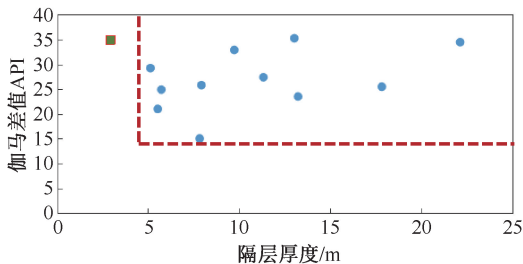


图1 压裂层位划分图版

Fig. 1 Fracturing horizon chart

2 机械封隔器分层压裂工艺

目前陆地油田普遍采用不动管柱分层压裂工艺^[13-15];Y344封隔器或者K344封隔器+投球滑套,该工艺关键技术为封隔器性能,常用封隔器性能参数如表1所示。海上低渗储层埋藏深、地层温度高、井斜大且老井套管腐蚀严重,现场应用过程中易出现砂卡管柱、封隔器失封等问题,严重影响压裂施工效率及地层产能释放。

针对上述问题,形成了2套大斜度井分层压裂工艺管柱,既提高了储层纵向动用程度,又幅度降低了井下事故概率。一套为封隔器+桥塞一体化分层压裂工艺管柱,主要适用于低压、欠压老井压裂改造(压裂后压力扩散快,不需要压井);另一套为多封隔器投球滑套分层压裂工艺管柱,主要适用于气井、高压井(压裂后压力扩散慢)等压裂改造。

表1 常用封隔器性能参数对比表

Table 1 Comparison table of commonly used packer performance parameters

对比项	Y344封隔器	K344封隔器
坐/解封方式	节流坐封、泄压解封	节流坐封、泄压解封
工作压差/MPa	70	70
工作温度/℃	>150	<150
胶筒护肩	有	无
工作后塑料变形	<3%, 肩部变形小	>5%, 肩部变形大
工作后密封胶筒	不易损坏	易脱胶

2.1 封隔器+桥塞一体化分层压裂工艺

封隔器+桥塞一体化分层压裂工艺管柱: 101.6 mm 钻杆+变扣+88.9 mm 油管校深短节+安全接头+反循环阀+水力锚+Y341封隔器+坐封滑套+一体化桥塞。主要工序: ①下压裂管柱、校深; ②投球, 送球至一体化桥塞, 加压 10 MPa 坐封桥塞; ③坐封后放压, 上提管柱 20 t 丢手, 下放 1~2 t 探塞面; ④上提管柱 Y341 封隔器坐封位置, 投球坐封封隔器; ⑤加压 20~25 MPa 逐段加压坐封封隔器, 提高压力至 30 MPa 以上打开坐封滑套, 开始施工; ⑥压裂完成后, 返排, 上提管柱解封 Y341 封隔器, 起出压裂管柱; ⑦再次下入一体化桥塞压裂管柱进行下一层施工; ⑧至最后一层施工完, 起出压裂管柱, 下入钻塞管柱, 钻塞、通井。

封隔器+桥塞一体化分层压裂工艺管柱通过一趟管柱完成了封隔上、下隔层的目的, 相比常规下桥塞、填砂分层压裂工艺大幅度提高了施工效率。具体工具性能参数见表 2, 管柱图见图 2。

表2 封隔器+桥塞一体化分层压裂工具参数表

Table 2 Packer + bridge plug integrated stratified fracturing tool parameter table

名称	外径/mm	内径/mm	温度级别/℃	压力级别/MPa
安全接头	114	58	150	
反循环阀	140	76	120	
水力锚	152	76	150	70
Y341封隔器	152	76	150	
坐封滑套	110	76(非球座尺寸)	150	
一体化桥塞	144	-	150	

2.2 多封隔器投球滑套分层压裂工艺

常规多封隔器投球滑套分层压裂管柱, 上部封隔器反复扩张次数多, 封隔器性能及密封效果受到影响; 另外, 滑套喷砂口和封隔器距离长, 喷砂口和封隔器之间沉砂易导致砂卡管柱。多封隔器投球滑套分层压裂工艺管柱通过一趟管柱完成封隔、多层压裂。与比常规多封隔器投球滑套管

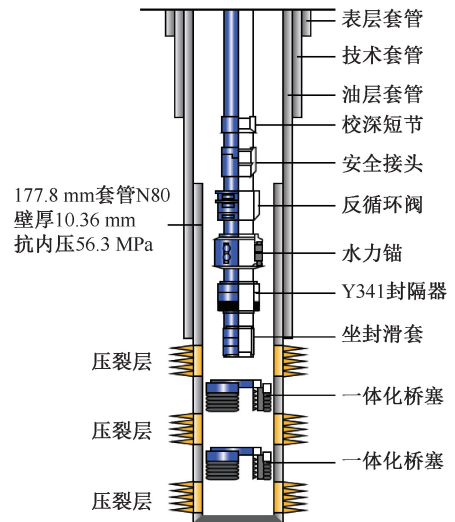


图2 封隔器+桥塞一体化分层压裂管柱

Fig. 2 Integrated plug-and-packer fracturing string with zonal isolation

柱相比, 上部封隔器避免反复坐封, 提高了封隔效果; 并且可通过环空压力监测判断压裂是否穿层, 又降低了砂卡风险。具体工具性能参数见表 3, 管柱图见图 3。

表3 多封隔器投球滑套分层压裂工具参数表

Table 3 Multi-packer ball slip stratified fracturing tool parameter table

名称	外径/mm	内径/mm	温度级别/℃	压力级别/MPa
安全接头	115	58	150	
反循环阀	140	76	120	
水力锚	148	76	150	70
新型 K344 封隔器	148	76	150	
喷砂滑套	115	41	150	

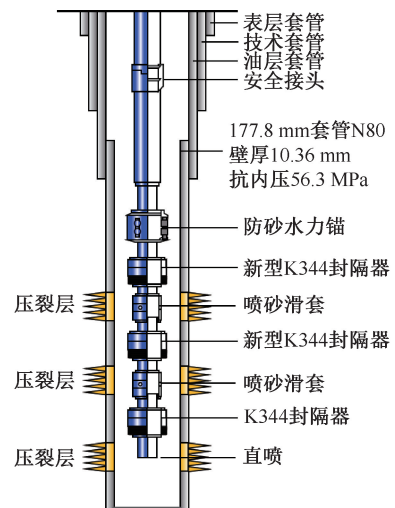


图3 多封隔器投球滑套分层压裂管柱

Fig. 3 Multiple packer-ball slip-on fracturing string with zonal isolation

3 暂堵转向分层压裂工艺

海上部分低渗储层厚度超过 60 m, 大段笼统射孔, 层段内隔层薄、层间应力差小, 采用机械封隔器分层压裂易窜层。因此, 根据 1.2 中压裂层段划分图版, 对于泥岩隔层厚度小于 5 m 的压裂层, 采用化学暂堵方式封堵已压开层段射孔孔眼, 可溶性暂堵球或者暂堵颗粒通过压裂液携带至已压开裂缝的孔眼, 在孔眼处形成桥堵, 井筒中的净压力升高, 从而在破裂压力更高的孔眼处产生新的水力裂缝, 根据储层条件可多次投入暂堵球, 从而实现储层纵向上充分改造, 施工结束一段时间后, 暂堵球在压裂液或者地层水中自然降解, 见图 4 层间暂堵转向压裂原理图。

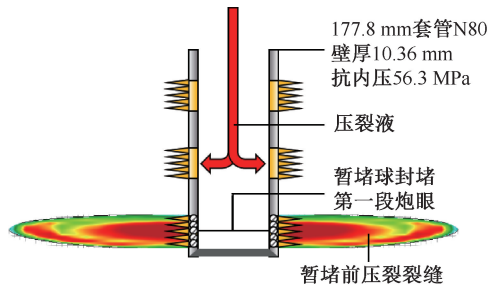


图 4 暂堵转向压裂原理图

Fig. 4 Temporary plugging fracturing principle diagram

通过实验优选出合适的可溶性暂堵球, 施工时具有足够的承压能力, 施工结束后一段时间内可以自然降解, 对地层没有污染。按照适应储层温度不同, 形成了低、中、高温系列化产品, 详细参数见表 4。

表 4 可溶性暂堵球性能参数表

Table 4 Soluble temporary plugging ball performance parameter table

类型	适应温度/°C	暂堵球直径/mm	承压能力/MPa	溶解时间
低温	30 ~ 90	定制尺寸: 5~22	50	定制化, 可调 长效: 1~2 d 短效: 4~24 h
中温	90 ~ 120	常规尺寸: 5.5、9、11		
高温	120 ~ 150	13、15、22		

50 MPa 恒定压差下可溶性暂堵球的承压效果如图 5 所示, 可以看出, 该条件下暂堵剂承压效果无降低趋势, 完全满足现场施工要求。

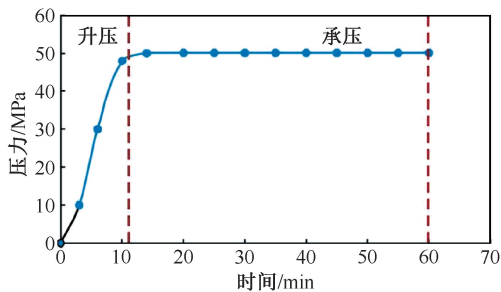


图 5 暂堵球承压能力曲线

Fig. 5 Pressure bearing capacity curve of temporary plugging ball

4 现场应用

海上某井储层斜深 3 986.8 ~ 4 034.5 m, 垂深 3 314.4 ~ 3 357.7 m, 油层垂厚 24.6 m, 结合地质工程甜点, 见图 6 所示, 优选射孔段为: 3 987.0 ~ 3 988.5 m; 4 001.0 ~ 4 002.5 m; 4 007.5 ~ 4 009.5 m; 4 019.05 ~ 4 021.0 m; 4 025.0 ~ 4 028.0 m; 目的层砂泥岩互层, 泥岩隔夹层非纯泥岩, 测井曲线算出纵向砂泥岩互层应力差较小, 储层内部应力差小 (0.8 ~ 3.1 MPa), 采用机械封层压窜几率大, 有砂卡

管柱风险。

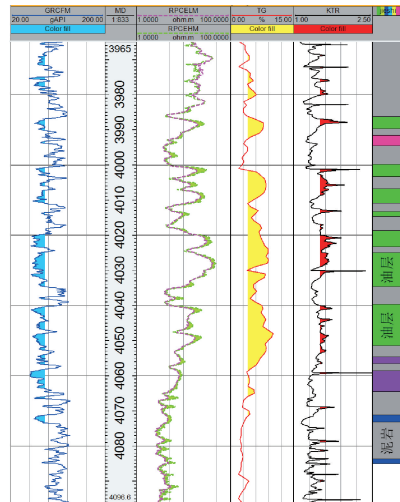


图 6 地质工程甜点预测图

Fig. 6 Geological engineering dessert prediction map

采用多簇射孔+暂堵工艺, 适当增大加砂规模和排量提高储层纵向和横向改造程度, 增大储层改造体积, 充分释放低渗储层产能。

送球阶段: 施工排量 2.2 ~ 2.7 m³/min, 注入液量达 43 m³ 时, 井口压力由 33.2 MPa 升高至 37.14 MPa, 送球到位, 暂堵显示明显, 转主压裂施工 (暂堵后) 阶段, 见图 7。

高频压力监测及评价技术是利用在井口地面

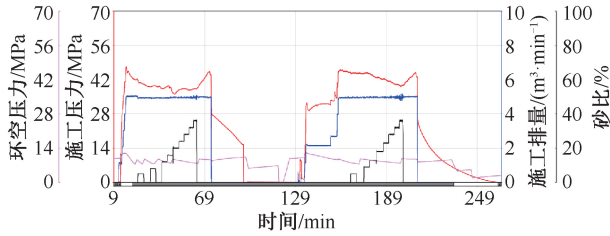


图7 主压裂施工曲线图

Fig. 7 Main fracturing construction curve

位置安装高频压力采集装置,在压裂施工期间持续以最高1 ms 间隔采集井口油套压力,结合波动压力分析与渗流压力的停泵压力降落试井模型等,对压裂期间的裂缝开启及暂堵进行定量化解释。该井暂堵前有 2 处进液点:分别位于分别位于井深 3 988 m 及 4 008 m 处;最终停泵显示 2 处进液,分别位于井深 4 002 m 及 4 026 m 处;对比进液位置,暂堵效果较好。该井射孔 5 簇,4 簇开启裂缝,见图 8。

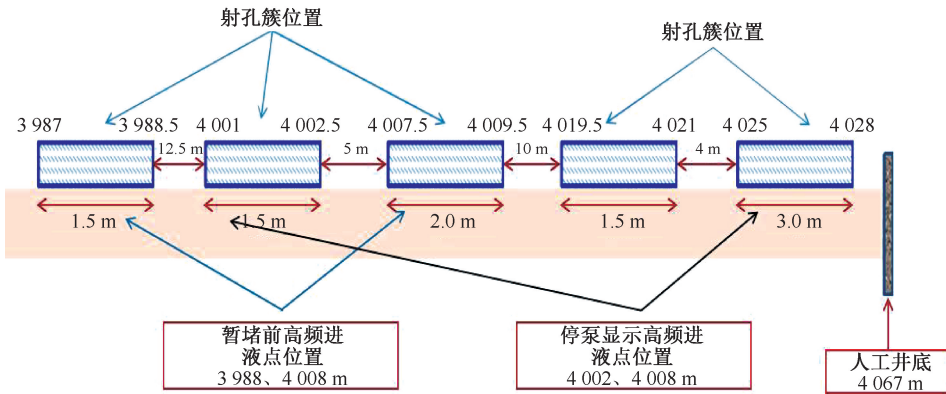


图8 高频压力监测解释图

Fig. 8 High frequency pressure monitoring interpretation diagram

通过高频压力监测解释,第二段加砂在一段加砂基础上开启了新的裂缝,与暂堵压力响应相吻合,表明暂堵工艺在大跨度薄互储层中起到了提高了储层段纵向改造程度的目的。该井压前关井无产量,压后日产油 118 m³/d,增产效果显著。

截至目前,海上低渗储层向细分层压裂技术,已应用 17 口井,效果十分显著,部分井压后效果详见图 9。部分井暂堵效果见表 5。

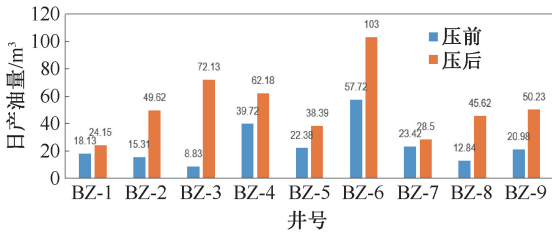


图9 压前压后产量对比图

Fig. 9 Comparison of production before and after fracturing

表5 暂堵升压效果统计

Table 5 Statistics of temporary plugging effect

井号	压裂段数	改造工艺	暂堵球直径/mm	暂堵升压/MPa
A-1	3(第二段暂堵)	暂堵压裂(注水井)	13	1.7
A-2	2(第一段暂堵)	暂堵压裂(采油井)	13	2~3
A-3	1	暂堵压裂(采油井)	15,18	0
A-4	1	暂堵压裂(采油井)	15,19	3.9
A-5	3	暂堵压裂(采油井)	15,18	第一段:3 第三段:2~3

5 结论

(1)在钻时、录井全烃研究基础上,形成了一套海上低渗储层地质工程甜点预测方法,并结合裂缝监测及现场施工数据,建立了压裂层位划分图版:泥岩隔层厚度大于 5 m、储隔层伽马差值大于 15。

(2)通过技术攻关,形成封隔器+桥塞一体化分层压裂工艺管柱与改进的多封隔器投球滑套分层压裂工艺管柱,有效降低了多层压裂砂卡管柱风险。

(3)为了最大程度实现储层纵向均匀改造,通过优化多封隔器管柱配置、优选暂堵球组合,提出了“机械封隔器硬分层+暂堵转向软分层”精细改造技术,大幅度改善了压后效果,推动了海上低渗储层经济有效开发。

致谢:感谢中海油田服务股份有限公司以及天津市海洋石油难动用储量开采企业重点实验室同意本文公开发表。

参考文献

[1] 孙福街,徐文江,姜维东,等. 中国海油低渗及非常规油气藏储层改造技术进展及展望[J]. 中国海上油气, 2024, 36 (1): 109-116.
SUN Fujie, XU Wenjiang, JIANG Weidong, et al. Progress and prospects of CNOOC's low permeability and unconventional oil and gas reservoir stimulation technologies [J].

- China Offshore Oil and Gas, 2024, 36 (1): 109-116.
- [2] 孙福街. 中国海上油田高效开发与提高采收率技术现状及展望[J]. 中国海上油气, 2023, 35 (5): 91-99.
SUN Fujie. Status and prospects efficient development and EOR technologies in China offshore oilfields [J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35 (5): 91-99.
- [3] 王万鹏, 石张泽, 贾奔. 海上油田压裂管柱遇卡原因分析及探索[J]. 石化技术, 2022, 29 (12): 105-107.
WANG Wanpeng, SHI Zhangze, JIA Ben. Analysis and exploration of the causes of fracturing string stuck in offshore oilfield [J]. Petrochemical Industry Technology, 2022, 29 (12): 105-107.
- [4] 刘义刚. 渤海油田低渗储层开采技术研究进展与展望[J]. 中国海上油气, 2024, 36 (1): 117-124.
LIU Yigang. Research progress and prospect of low-permeability reservoir exploitation technology in Bohai oilfield [J]. China Offshore Oil and Gas, 2024, 36 (1): 117-124.
- [5] 路智勇. 转向压裂用暂堵剂研究进展与展望[J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (31): 12691-12701.
LU Zhiyong. Research progress and prospect of transient plugging agents for diversion fracturing [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20 (31): 12691-12701.
- [6] 周福建, 袁立山, 刘雄飞, 等. 暂堵转向压裂关键技术与进展[J]. 石油科学通报, 2022, 7 (3): 365-381.
ZHOU Fujian, YUAN Lishan, LIU Xiongfei, et al. Key technologies and progress of temporary plugging and fracturing [J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 7 (3): 365-381.
- [7] 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.
- [8] 王博. 暂堵压裂裂缝封堵与转向规律研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019: 59-67.
WANG Bo. Investigation of fracture plugging and diverting patterns in temporary plugging and diverting fracturing [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019: 59-67.
- [9] 郭建春, 詹立, 路千里, 等. 暂堵颗粒在水力裂缝中的封堵行为特征[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50 (2): 409-414.
GUO Jianchun, ZHAN Li, LU Qianli, et al. Plugging behaviors of temporary plugging particles in hydraulic fractures [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 409-414.
- [10] 徐国伟, 邹国庆, 朱绕云. 库车凹陷博孜超深凝析气藏加砂压裂技术[J]. 油气井测试, 2020, 29(6): 50-54.
XU Guowei, ZOU Guoqing, ZHU Raoyun. Sand fracturing technology of Bozi ultra deep condensate gas reservoir in Kuqa depression [J]. Well Testing, 2020, 29(6): 50-54.
- [11] 范白涛, 陈峥嵘, 姜浒, 等. 中国海油非常规和海上低渗储层压裂技术现状与展望[J]. 中国海上油气, 2021, 33 (4): 112-119.
FAN Baitao, CHEN Zhengrong, JIANG Hu, et al. Status and prospect of fracturing technology of CNOOC unconventional and offshore low permeability reservoir [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33 (4): 112-119.
- [12] 刘子雄, 李啸南, 王金伟, 等. 致密气藏水平井甜点段识别方法研究[J]. 中国石油勘探, 2021, 26 (3): 117-125.
LIU Zixiong, LI Xiaonan, WANG Jinwei, et al. Study on method of sweet spot interval identification of tight gas reservoir in horizontal well [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26 (3): 117-125.
- [13] 王克林, 张波, 李超, 等. 库车山前深层高温高压气井多封隔器分层压裂工艺[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43 (2): 239-243.
WANG Kelin, ZHANG Bo, LI Chao, et al. Multi-packer separate layer fracturing technology for deep, high temperature and high pressure gas wells in Kuqa piedmont [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43 (2): 239-243.
- [14] 张文星, 张华光, 任国富, 等. 套管滑套分层压裂工具[J]. 石油矿场机械, 2016, 45 (3): 81-83.
ZHANG Wenxing, ZHANG Huaguang, REN Guofu, et al. Layered fracturing tool of cementing sleeve [J]. Oil Field Machinery, 2016, 45 (3): 81-83.
- [15] 张华光, 桂捷, 张丽娟, 等. 苏里格气田机械封隔器连续分层压裂技术[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35 (4): 85-87.
ZHANG Huaguang, GUI Jie, ZHANG Lijuan, et al. Continuously separate layer fracturing technology by using mechanical packer in Sulige gas field [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35 (4): 85-87.

编辑 吴志力

第一作者简介: 徐延涛, 男, 1983 年出生, 高级工程师, 2010 年毕业于中国石油大学(华东), 硕士研究生。现从事油气储层改造理论技术研究与应用工作。电话: 18902027929; Email: xuyt4@cosl.com.cn。通信地址: 天津市滨海新区海川路 1581 号中海油服油田生产研究院, 邮政编码: 300459。