

超深火成岩英买 4-2X 井加砂压裂技术

刘辉, 杨向同, 袁学芳, 刘举, 任登峰, 任慧宁

中国石油塔里木油田分公司油气工程研究院 新疆库尔勒 841000

通讯作者:Email:renhn-tlm@petrochina.com.cn

项目支持:国家重大科技专项“超深超高压高温气井优快建井与采气技术”(2016ZX05051-003)

引用:刘辉,杨向同,袁学芳,等. 超深火成岩英买 4-2X 井加砂压裂技术[J]. 油气井测试,2018,27(6):46-50.

Cite: LIU Hui, YANG Xiangtong, YUAN Xuefang, et al. Sand fracturing technology for ultradeep igneous formation in Well Yingmai 4-2X [J]. Well Testing, 2018,27(6):46-50.

摘要 英买 4-2X 井为塔里木油田火成岩首口加砂压裂改造井,井斜大,储层埋藏超深(大于 5 600 m),属于中孔特低渗储层,具有中孔细喉型结构,高角度天然裂缝发育,加砂压裂施工难度和风险高。结合储层特点,优选低伤害 0.3% 瓜胶压裂体系,采用前置酸降破处理,适当提高前置液比例,采用多级支撑剂段塞打磨技术等措施,成功对英买 4-2X 大斜度井实施了加砂压裂改造。施工挤入地层液体 559 m³,最高排量 4.2 m³/min,施工压力 88~93 MPa(接近管柱安全极限),挤入地层砂量 22.2 m³。压后气举求产,日产油 4.52 m³,日产水 23.83 m³,为低产油水同层。但由于采用常规压裂施工井口和 81.28 mm 管柱,施工排量受限,砂堵风险较大,加砂量未达到设计要求。建议该区块后期单井压裂施工设计时考虑采用较大尺寸施工管柱,为压裂施工提供合适的压力空间,提高改造效果。

关键词 超深火成岩; 特低渗储层; 加砂压裂; 压裂管柱; 施工排量; 施工曲线; 压后评估

中图分类号:TE357 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.06.008

Sand fracturing technology for ultradeep igneous formation in Well Yingmai 4-2X

LIU Hui, YANG Xiangtong, YUAN Xuefang, LIU Ju, REN Dengfeng, REN Huining

Oil and Gas Engineering Research Institute, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China

Abstract: Well Yingmai 4-2X is the first sand-fracturing well in the igneous rock in Tarim Oilfield with high inclination. The reservoir, with medium porosity and low permeability, is buried deep (>5 600 m) with medium porosity fine throat structure and high-angle natural fracture, making the sand fracturing difficult and risky. Considering the characteristics of the reservoir, the low-damage 0.3% guar fracturing system is selected. The lead acid is treated with gel breaking capacity reduction. The proportion of the lead fluid is appropriately increased. The multistage proppant slug grinding technology is adopted. The sand fracturing has been successfully done in Well Yingmai 4-2X with stimulation liquid of 559 m³ and sand of 22.2 m³ under the highest displacement of 4.2 m³/min and the pumping pressure of 88~93 MPa (close to the safety limit of the fracturing string). Gas lift production after the fracturing showed a daily oil production of 4.52 m³ and the daily water production of 23.83 m³, indicating a low-yield oil and water production layer. However, due to the use of conventional fracturing wellhead and 81.28 mm pipe string, the limited pumping displacement results in large sand blocking risk, and consequently the sand amount does not meet the design requirements. It is suggested that the single-well fracturing design in the later stage of the block development should consider the use of larger-size pipe string to provide suitable pressure limit for fracturing operation and improve the stimulation effect.

Keywords: ultra-deep igneous rock; ultra-low permeability reservoir; sand fracturing; fracturing string; pumping displacement; pressure curve; post-fracturing evaluation

目前,美国、俄罗斯、阿塞拜疆、越南及中国等都有以火山岩油藏为主的较大型油气田。火成岩地层是一种脆性地层,延展性很小,其地层致密、低孔低渗、连通性差,微裂缝发育,油气藏产量较低,有效储层预测、识别以及开采困难^[1-3]。因此,很多

该类型油气藏需要通过有效的增产改造技术才能使油气藏高效开采,而水力压裂是火成岩气藏增产改造最有效的手段^[4-6]。阿根廷 Cupen Mahuida 裂缝性火山岩油藏压裂施工 16 次,其中 5 次发生早期脱砂^[7]。压裂施工失败是由于储层天然裂缝相对

发育,导致注入压力过高。分析认为,应减小射开程度、调整加砂强度来降低施工难度。日本 Minami-Nagaoka 气田中新世流纹岩加砂压裂成功改造,采取的主要措施是:使用小粒径支撑剂、减小射孔层段长度,采用支撑剂段塞技术,用大直径油管增大泵注排量,提高液体黏度,使用超压射孔解决近井裂缝弯曲等^[8]。近年来,我国在大庆海拉尔、辽河东部凹陷、吐哈三塘湖、内蒙查干凹陷和新疆克拉美丽油气田等地陆续开展火成岩油气增产技术实践研究,并取得了一定的开发经验和成果^[9-12]。这些实践研究成果主要集中在水力裂缝延伸特征、压裂液滤失机制、压裂测试技术与裂缝诊断以压裂材料及工艺等方面^[13]。

塔里木盆地二叠系发育多种类型火成岩,塔北地区英买4X井区火成岩储层孔隙度范围8%~12%,平均为11.09%,孔隙连通性差,渗透率平均0.85 mD,属中孔特低渗储层。英买4-2X井为区块第二口火成岩井,火成岩类型为灰色油斑流纹岩,铸体薄片标本显示基质孔隙发育,压汞实验显示火成岩储层排驱压力高,中值孔喉半径小(80 mD),孔喉结构属中孔细喉型。测井解释Ⅱ类差油层22.5 m/2层、Ⅲ类储层44.5 m/4层,孔隙度7.6%~10.9%,成像测井共见天然裂缝51条,天然裂缝走向为北东向,储层裂缝较发育,主应力方位北东60°。该区块火成岩无加砂压裂改造经验,改造风险较大。结合储层特点及技术调研,对本井从压裂材料和改造工艺进行优化,优选低伤害0.3%瓜胶压裂体系,改造采用前置酸降破处理,适当提高前置液比例,采用多级支撑剂段塞打磨技术等措施。2017年9月9日英买4-2X井加砂压裂成功实施,施工规模559.0 m³,最高排量4.2 m³/min,最高泵压94.4 MPa,挤入地层砂量22.2 m³,最高砂比14%,初步获得该区块火成岩储层加砂压裂技术宝贵经验。

1 加砂压裂难点及技术对策

(1)火成岩储层由于其岩石力学特点及受构造运动影响,其内部岩性非常不均质,使其压裂区别于砂岩、致密砂岩储层压裂。火成岩储层中裂缝的扩展更为复杂,其压裂难度远远高于沉积岩油藏。前期现场实验表明,采用与沉积岩油藏类似的压裂工艺和方法,压裂施工成功率很低。塔里木英买构造带火成岩储层埋藏超深(大于5 600 m),储层岩

石力学性质、滤失特性、裂缝起裂与延伸规律认识的可借鉴研究资料较少,对该类储层压裂前需要加强基础研究认识,即加强储层评价和岩心评价试验,储层拟地层三轴力学、应力敏感实验、恒速压汞、核磁共振等实验,充分认识储层特征,优化压裂设计参数。

(2)本次火成岩改造井英买4-2X井测井资料不全,按电阻率和声波曲线只进行可能储层划分,解释可能储层71.0 m/5层。参考邻井英买4-1井FMI测井解释,储层北东向高角度天然裂缝发育。此类储层施工过程中易产生多裂缝,不易形成主裂缝,且缝高可能沿着天然裂缝向上、下过度延伸,压裂液高滤失,施工风险极大,有早期砂堵的风险。为此,采取施工对策:适当提高前置液量,多级支撑剂段塞打磨与试探性加砂,降低孔眼摩阻和裂缝弯曲摩阻^[14-15];低起步、小增幅加砂,延长低、中砂比段泵注时间,沟通更多的裂隙系统。

(3)邻井火成岩储层岩心实验测试孔隙度平均值为11.09%,渗透率平均值为0.85 mD,属中孔特低渗储层。压裂改造方案原则应以造长缝为主,尽量提高加砂规模。但考虑储层高角度裂缝发育、储层底水块状或准层状油气藏特征,改造适当控制加砂规模为^[16]。

(4)邻井火成岩岩心孔喉结构属于中孔细喉型,储层黏土矿物含量高(33.7%),伊蒙混层含量较高,储层潜在伤害较大。针对此类储层,宜采取优选0.3%低浓度瓜胶体系,在保证悬砂效果的同时,减少聚合物进入地层,压后及时返排并合理控制排液速度,减少压裂液对裂缝及储层的伤害。

(5)本井为大斜度井(井斜度69°),因井斜的影响造成裂缝起裂方向与最大主应力方向不一致,这样造成裂缝在近井地带产生弯曲,裂缝宽度变窄,增加了近井地带摩阻,造成破裂压力和施工压力高于直井的情况,在加砂阶段易出现异常高压现象^[17]。针对本井大斜度井身结构,压裂施工适当增加前置液量,以增加裂缝体积;提高施工排量,增加裂缝宽度;同时进行支撑剂多段段塞,封堵微裂缝,冲蚀裂缝弯曲段,降低加砂阶段砂堵风险。

2 压裂施工设计及现场施工

英买4-2X井为首口塔里木盆地火成岩加砂压裂改造井,压裂施工以获取产能为目的的同时,还需通获取储层改造技术重要参数,因此必须做好施

工设计方案的优化及改造后评估工作。

2.1 压裂施工设计

本着安全施工为前提,在现有井身斜度较大及施工管柱条件限制下,必须考虑主压裂前进行小型测试压裂,根据测试压裂显示,进而优化调整主压裂现场的施工方案。

2.1.1 管柱及施工压力预测

根据现有情况,压裂井口采用 KQ78/65-105 型

采油树;管柱组合为:88.9 mm P110 油管(4 530 m)+73.02 mm P110 油管(900 m)油管+封隔器注入,该井井身结构及管柱示意如图 1 所示。结合邻井钻井泥浆密度及应力计算结果,预测施工排量 4.5 m³/min 时,施工压力 79 MPa 左右,考虑该井身井斜较大(69°左右),结合管柱井口限压要求,附加近井扭曲摩阻及多裂缝区域压降 10 MPa,预测正常施工压力 90 MPa。

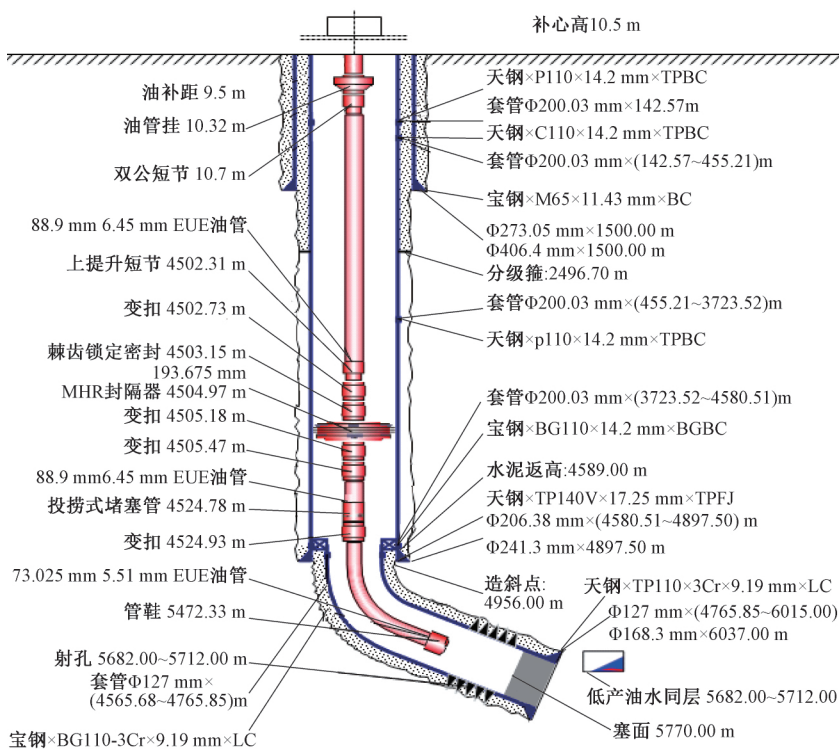


图 1 英买 4-2X 井身结构及管柱示意图

Fig.1 Well structure and string diagram of YM4-2X Well

2.1.2 小型压裂测试

根据测试压裂解释结果可及时调整主压裂施工参数和泵注程序。小型测试压裂采用压裂液基液注入,测试规模 40 m³。

2.1.3 施工规模及参数优化

采用压裂软件模拟不同规模液量下人工裂缝延伸效果,优化施工最高排量为 4.5 m³/min,主压裂规模 500 m³、加砂量 40 m³。

2.2 压裂现场施工及压后评估分析

小型压裂测试表明,该井施工难度大于预期方案设计。因此,对压裂施工参数进行了调整,主压裂施工期间及时调整施工参数及砂量,在施工承压条件下,最大限度降低砂堵风险。

2.2.1 小型压裂测试

小型压裂施工排量 4 m³/min 时泵压 92 MPa,在施

工限压 95 MPa 下,施工排量达不到设计目标排量 4.5 m³/min。阶梯降排量分析,施工排量在 4.0 m³/min 下,近井总摩阻为 10 MPa,其中孔眼摩阻约 3 MPa,近井筒摩阻约 7 MPa,有效孔数约 8 个,分析闭合应力梯度为 1.66 MPa/100 m,拟合地层有效渗透率 0.75 mD,压裂液滤失系数 6.16×10⁻³ m/min^{1/2}。

测试压裂解释结果表明,本井火成岩改造段岩性致密,裂缝延伸压力梯度,近井摩阻大,在井口装置限压条件下,加砂泵注实际主压裂施工阶段达不到原设计的泵注排量 4.5 m³/min 和加砂浓度的要求。因此,对主压裂施工泵注程序进行针对性的调整如下:(1)施工排量调至 4 m³/min;若施工压力超过 90 MPa,继续调低施工排量。(2)施工砂比由原设计 18.5%降低至 15.9%。(3)主压裂前进行酸浸降破处理。

2.2.2 加砂压裂施工

2017年9月9日英买4-2X井压裂施工,挤入地层总液量 559.4 m^3 ,挤入地层总砂量 22.2 m^3 ,最高加砂比12%,平均加砂比9.5%;施工泵压一般90 MPa,最高94.4 MPa;施工排量一般 $3.5\text{ m}^3/\text{min}$,最高 $4.21\text{ m}^3/\text{min}$;测压降1 h,油压由53.40 MPa降至42.56 MPa。压后气举排液,油压0~0.83 MPa,折日产油 4.5 m^3 ,日产水 23.8 m^3 ,气微量。试油结论为低产油水同层。

2.2.3 压裂后评估分析

英买4-2X井施工期间排量低但泵压较高,加砂难度及风险大(图2)。主压裂前进行酸浸降破处理,降压有效果但不明显。在 $4\text{ m}^3/\text{min}$ 排量下,泵压由测试压裂的92 MPa降至主压裂施工前期的88 MPa,说明盐酸体系对该储层火成岩有一定的溶蚀降破能力。

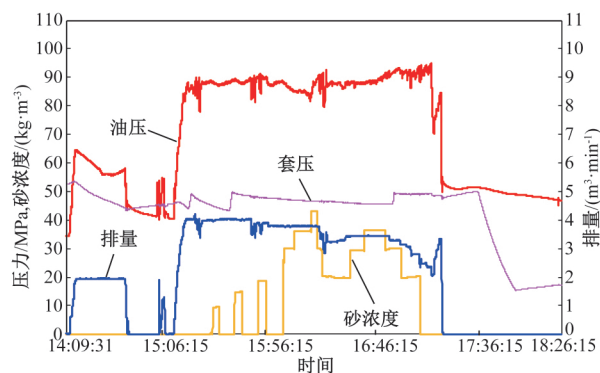


图2 英买4-2X井压裂施工曲线图

Fig.2 Fracturing pressure curve and G function curve of Well Yingmai 4-2X

前置液阶段支撑剂段塞降压效果不明显,阶段施工泵压仅下降1.8 MPa(88.2 MPa降至86.4 MPa),原因可能是支撑剂段塞所用的支撑剂粒径较大(30/50目),前置液阶段人工裂缝宽度小,支撑剂难以进入裂缝深部进行打磨。

压裂层射孔段长度30 m,储层天然裂缝发育,在较高施工压力下,可能有多个天然裂缝被压开,降低了进入主裂缝的有效排量,主裂缝宽度小,造成了施工压力对增加砂浓度变化敏感,施工后期泵压上行趋势明显,砂堵风险较大。

从井压裂曲线整体看,施工在高挤携砂液期间,排量曲线降低但泵压曲线不断抬升,说明人工裂缝窄,储层加砂困难,砂堵风险较大。施工后期顶替期间压力突降,94 MPa降至70 MPa,沟通天然裂缝发育带反应明显。

压裂施工G函数曲线出现双底形态(图3),反映压裂过程中主裂缝扩展受到了张性天然裂缝的影响,可能形成多缝,拟合主压裂裂缝闭合压力梯度 0.0171 MPa/m ,拟合体积因子2.0,滤失因子1.5,开缝因子2。

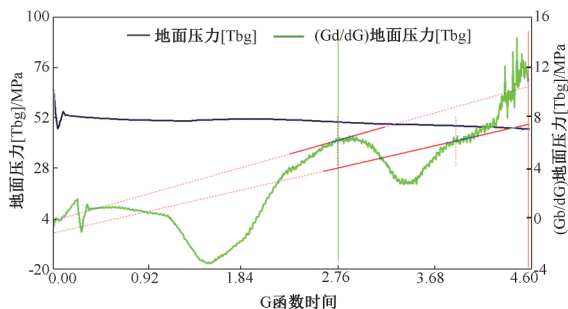


图3 英买4-2X井压裂施工G函数曲线图

Fig.3 Fracturing construction G function curve diagram of YM4-2X Well

3 结论

(1)本次施工是塔里木油田二叠系火成岩首次加砂压裂改造,在储层地质条件复杂、工程条件限制下完成,在该区块探索实施了大斜度火成岩井加砂压裂改造,获取宝贵的技术资料。压裂拟合分析结果:施工近井总摩阻10 MPa,其中近井筒摩阻约7 MPa;拟合分析闭合应力梯度 $1.66\sim 1.71\text{ MPa}/100\text{ m}$,拟合地层有效渗透率 0.75 mD 。主压裂G函数曲线出现双底形态,反映出压裂过程中主裂缝扩展受到了张性天然裂缝的影响,形成多缝可能性很大。

(2)压裂施工过程中的多裂缝易造成主缝宽度减小、滤失量增多,从而加大了缝内脱砂的风险。本井施工采用前置液段塞30/50目支撑剂降压效果不明显,建议后期作业可使用凝胶段塞对近井多缝进行处理,保证主裂缝的形成;在前置液中加入粉砂段塞,处理裂缝延伸过程中同时开启的天然裂缝,降低滤失,减小摩阻,保证主裂缝的正常延伸。

(3)英买二叠系火成岩地层应力较高,天然裂缝发育,采用常规压裂施工井口和 81.28 mm 管柱条件下,施工压力可操作空间十分有限。加砂过程中施工压力的不确定性造成砂堵几率大大增加。建议后期改造采取优化管柱配置或采用加重压裂液等措施,提高施工作业压力空间及加砂效果。

致谢:感谢国家重大科技专项“超深超高压高温气井优快建井与采气技术”项目支持;论文在撰写过程中得到单位同事们的中肯建议和大力帮助,在此表示感谢。另外,本人申明文章涉及内容已通过单位审核。

参考文献

- [1] 王全柱. 火成岩储层研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2004, 19(2): 13-16.
WANG Quanzhu. Study on igneous rock reservoir [J]. Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition), 2004, 19(2): 13-16.
- [2] 仲维维, 卢双舫, 张世广, 等. 火成岩储层物性特征及其影响因素——以松辽盆地南部英台断陷龙深 1 井区为例[J]. 沉积学报, 2010, 28(3): 563-571.
ZHONG Weiwei, LU Shuangfang, ZHANG Shiguang, et al. Porosity and permeability of the volcanic reservoir and its influencing factors: Taking well Longshen1 field of Yingtai fault as an example [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(3): 563-571.
- [3] 孟卫工, 陈振岩, 张斌, 等. 辽河坳陷火成岩油气藏勘探关键技术[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(3): 45-57.
MENG Weigong, CHEN Zhenyan, ZHANG Bin, et al. Key technology for exploration of igneous reservoirs in Liaohe Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(3): 45-57.
- [4] ZHAO Z, LIU D, LIU W, et al. Development and field application for integrated fracturing technology of volcanic reservoir [J]. Petrochemical Safety Technology, 2006, 22(8): 88-90.
- [5] 张守江, 郑恒, 穆景福, 等. 致密气藏水平井水力压裂簇间距优化研究[J]. 油气井测试, 2017, 26(3): 5-9, 14.
ZHANG Shoujiang, ZHENG Heng, MU Jingfu, et al. Study on optimization of hydraulic fracturing cluster spacing to horizontal well in dense gas reservoir [J]. Well Testing, 2017, 26(3): 5-9, 14.
- [6] 王海华, 田黔宁. 非常规油气田储层增产技术探究[J]. 油气井测试, 2017, 26(5): 47-50.
WANG Haihua, TIAN Qianning. Research of reservoir stimulation technology in unconventional oil and gas field [J]. Well Testing, 2017, 26(5): 47-50.
- [7] 罗艳杨, 季春海, 柯思, 等. 阿根廷内乌肯盆地海相火山岩储层形成的控制因素[J]. 内蒙古石油化工, 2010(14): 122-123.
LUO Yanyang, JI Chunhai, KE Si, et al. The controlling factors of marine volcanic reservoir in Argentina's Neuquen basin [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2010(14): 122-123.
- [8] WEIJERS L, WRIGHT C A, SUGIYAMA H, et al. Japan frac succeeds in deep, naturally fractured volcanic [J]. Oil & Gas Journal, 2003, 101(21): 43-49.
- [9] 冯程滨, 谢朝阳, 张永平. 大庆深部裂缝型火成岩储气层压裂技术试验[J]. 天然气工业, 2006, 26(6): 108-110.
FENG Chengbin, XIE Chaoyang, ZHANG Yongping. Fracturing technology of deep fractured volcanic gas reservoirs in Daqing oilfield [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(6): 108-110.
- [10] 王守刚, 曹君, 吕俊, 等. 辽河坳陷火山岩油藏勘探压裂配套技术与应用[J]. 中国石油勘探, 2005, 11(4): 51-55.
WANG Shougang, CAO Jun, LYU Jun, et al. Fracturing technique and its application of volcanic oil reservoir in Liaohe Depression [J]. China Petroleum Exploration, 2005, 11(4): 51-55.
- [11] 凌立苏, 许江文, 金立新, 等. 克拉美丽石炭系火成岩气藏勘探试气配套技术应用[J]. 油气井测试, 2010, 19(2): 47-50.
LING Lisu, XU Jiangwen, JIN Lixin, et al. Application of suitable gas well testing technology during exploring of gas pool in Carbonic Volcanic Rock in Kelameili gas field [J]. Well Testing, 2010, 19(2): 47-50.
- [12] 李洪达, 刘云岭, 蔡江, 等. 南堡 5 号构造深层火成岩压裂技术研究及应用[J]. 油气井测试, 2010, 19(4): 36-38.
LI Hongda, LIU Yunling, CAI Jiang, et al. Research on fracturing tech for deep igneous rock of Nanpu 5th structure and its application [J]. Well Testing, 2010, 19(4): 36-38.
- [13] 郭洋, 杨胜来. 我国火山岩油气藏压裂技术研究进展[J]. 天然气与石油, 2012, 30(2): 49-51.
GUO Yang, YANG Shenglai. Current status and development trend of volcanic reservoir fracturing technology in China [J]. Oil and Gas Field Development, 2012, 30(2): 49-51.
- [14] 陈志雄. 斜井压裂砂堵原因分析及解决办法[J]. 油气井测试, 2003, 12(3): 36-37, 39.
CHEN Zhixiong. The sand slug analysis and resolving method during fracturing in slant well [J]. Well Testing, 2003, 12(3): 36-37, 39.
- [15] 傅玉, 李永明, 丁咚. 川西地区自悬浮支撑剂加砂压裂技术先导试验[J]. 油气井测试, 2018, 27(1): 42-47.
FU Yu, LI Yongming, DING Dong. Field test of self-suspending proppant for sand fracturing technology in West Sichuan [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 42-47.
- [16] 埃克诺米德 M J. 油藏增产措施[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991: 151-152.
- [17] 张孟东. 大斜度井压裂工艺研究与应用[J]. 中国新技术新产品, 2012(18): 151.
ZHANG Mengdong. Research and application of fracturing technology in high slope wells [J]. China New Technologies and Products, 2012(18): 151.

编辑 王 军

第一作者简介: 刘辉, 男, 高级工程师, 2010 年毕业于西南石油大学油气田开发专业, 主要从事油气田储层改造与保护研究工作。电话: 0996-2173314, 15999012568; Email: liuhui1-tlm@petrochina.com.cn。通信地址: 新疆库勒石化大道 26 号, 邮政编码: 841000。