

塔河油田碳酸盐岩油藏水平井暂堵分段酸压技术

张 雄, 耿宇迪, 焦克波, 侯 帆, 罗攀登

(中国石化西北油田分公司工程技术研究院, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘 要:针对塔河油田裸眼水平井“封隔器+滑套”分段酸压费用高、作业周期长、分段工艺复杂、分段工具可靠性低、工具留井后处理难度大等问题,通过“纤维+颗粒”复合暂堵代替“封隔器+滑套”分段,完成单段酸压后注入“纤维+颗粒”复合段塞,在裂缝端口架桥形成具有一定封堵强度的暂堵层,迫使裂缝从下一段起裂,实现无工具分段酸压。通过室内试验优选出耐温 120 ℃ 的暂堵纤维,120 ℃ 下其在清水及盐酸中 2 h 的溶解率小于 40%,可保证持续暂堵效果,最终溶解率 100%,不伤害储层;优化了纤维和颗粒的尺寸及质量分数,质量分数为 1.0%~2.0%、长度为 6~8 mm 的纤维+质量分数为 0.5%、直径为 1.0 mm 的颗粒其暂堵压力大于 9 MPa。该技术在塔河油田应用 8 井次,施工暂堵压力 6.6~9.0 MPa,单井改造后产能大幅度提高,施工费用降低,累计增油 5.6×10^4 t。研究结果表明,水平井暂堵分段酸压技术无需分段工具,解决了塔河油田碳酸盐岩水平井酸压工具下入和后期处理困难等问题。

关键词:碳酸盐岩油藏;水平井;暂堵;分段酸压;塔河油田

中图分类号:TE357.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2016)04-0082-06

The Technology of Multi-Stage Acid Fracturing in Horizontal Well for Carbonate Reservoir by Temporary Plugging Ways in the Tahe Oilfield

ZHANG Xiong, GENG Yudi, JIAO Kebo, HOU Fan, LUO Pandeng

(Engineering Technology Research Institute, Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang, 830011, China)

Abstract: During the course of multi-stage acid fracturing in open hole of horizontal wells in the Tahe Oilfield, “packer+slide sleeve” methods are featured with high operation costs, long working cycle, complicated stage fracturing, low reliability of relevant tools, difficult to handle the tools left in the hole etc. To eliminate these problems, “fiber+particles” composite temporary plugging operations have been used to replace the conventional “packer+slide sleeve” techniques. Upon completion of acid fracturing in a single interval, “fiber+particles” can be injected to generate barriers at opening of fracture, the crack initiation will be in the next section, hereby the sectional fracturing can be performed without staged tools. Through laboratory tests, the temporary plugging fibers with temperature resistance up to 120 ℃ have been deployed, its dissolution rate is below 40% in fresh water and hydrochloride acid under temperature of 120 ℃ for two hours, which keeps satisfactory temporary plugging effect and has ultimate dissolution rate of 100%, no damage to reservoir formations. Mass fractions of fibers and particle size were optimized, i. e. fiber length of 6-8 mm with mass fraction of 1.0%-2.0%, particle size of 1.0 mm with mass fraction of 0.5%, temporary plugging pressures > 9 MPa. The techniques have been applied for 8 times in the Tahe Oilfield, with initial plugging pressures of 6.6-9.0 MPa, the single well production capacity has been raised significantly, and operation cost lowered, cumulative increase of oil 5.6×10^4 t. Research results showed that temporary plugging and staged acid fracturing for horizontal wells did not require the staged tools, so it can eliminate the problem of running and pulling relevant tools that ever used in conventional operation in horizontal wells of carbonate formations in the Tahe Oilfield.

Key words: carbonate reservoir; horizontal well; temporary plugging; multi-stage acid fracturing; Tahe Oilfield

塔河油田缝洞型碳酸盐岩储层埋藏深、温度高、非均质性强,自然投产率很低,酸压已成为储层改造的重要方式^[1-7]。该油田碳酸盐岩油藏水平井储层改造主要应用“封隔器+滑套”分段酸压技术^[8-9],存在费用高、作业周期长、分段工艺复杂、对分段工具要求高、分段工具可靠性低、工具留井后处理难度大

收稿日期:2015-10-21;改回日期:2016-04-29。

作者简介:张雄(1986—),男,四川绵阳人,2009年毕业于中国石油大学(北京)石油工程专业,2012年获中国石油大学(北京)油气田开发工程专业硕士学位,助理研究员,主要从事储层改造技术及理论研究。E-mail:zhangnoland@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“缝洞型碳酸盐岩油藏高效酸压改造技术”(编号:2011ZX05014-006)资助。

等缺点^[10-11]。

为此,塔河油田提出了用“可降解聚丙烯腈纤维+聚合物颗粒”(以下简称“纤维+颗粒”)暂堵代替“封隔器+滑套”分段的技术思路,通过室内试验优选纤维种类及颗粒直径,并评价不同纤维及颗粒质量分数对不同缝宽的暂堵压力^[12-15],确定了暂堵缝宽、纤维及颗粒质量分数等参数值,再应用相关软件模拟得到所需缝宽下的排量作为暂堵段塞注入排量,并根据储集体与井筒距离确定每一段酸压压裂液及酸液的用量^[16-17],形成碳酸盐岩油藏水平井暂堵分段酸压技术。8 井次的现场应用表明,该技术可实现水平井无工具分段酸压,并能大幅度节省酸压费用、提高碳酸盐岩储集体沟通率。

1 技术原理

在应用“封隔器+滑套”进行分段酸压时,封隔器及滑套下入过程中常因遇阻而下入困难,且施工过程中会存在封隔器无法坐封或滑套无法正常打开等问题,导致分段酸压不能顺利进行甚至失败,而用“纤维+颗粒”代替“封隔器+滑套”的暂堵分段酸压技术,可完全避免上述问题,且施工结束后可降解聚丙烯腈纤维和聚合物颗粒会自动溶解,不伤害储层。

该技术的基本原理为:在第一段酸压完成后,注入携带“纤维+颗粒”的压裂液段塞,段塞液进入第一段酸压形成的裂缝端口时,纤维及颗粒不断架桥堆积并压实,形成具有一定暂堵压力的阻挡层,迫使液体转向进入第二段储层;然后提高排量进行第二段储层的酸压施工,从而达到分段酸压的目的。

2 室内试验

为了保证施工过程中连续暂堵,并达到有效分段的目的,需要优选溶解速度缓慢并能最终完全溶解的纤维,且塔河油田产层起裂压力差主要集中在 5~9 MPa,需要对“纤维+颗粒”的暂堵压力进行评价,以优选出暂堵压力大于 9 MPa 的暂堵组合。

2.1 纤维优选

2.1.1 优选原则

根据施工需求,制定了纤维优选原则:1)耐酸,避免与酸接触后快速溶解而失去暂堵能力;2)由于

单段酸压施工时间约为 2 h,为了确保施工时的持续暂堵效果,纤维 2 h 溶解率需小于 40%;3)最终可完全降解,避免伤害储层。

2.1.2 试验方法

取清水和 20% HCl 溶液各 100 mL,分别加入 2 g 纤维,置于密闭聚四氟乙烯罐内;将滚子炉加热至 120 °C 恒温,放入盛有样品的聚四氟乙烯罐,在一定时间(0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0 和 8.0 h)后取出,过滤、烘干并称量,然后计算纤维溶解率。

2.1.3 试验结果

1—3 号纤维的溶解试验结果如图 1 所示。

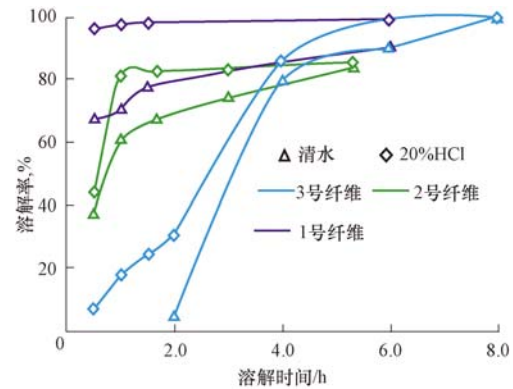


图 1 不同纤维的溶解试验结果

Fig. 1 Results of dissolution experiments for different fibers

从图 1 可以看出,120 °C 温度下,在清水及 20% 盐酸中,1 号纤维的 2 h 溶解率大于 80%,2 号纤维的 2 h 溶解率大于 60%,3 号纤维的 2 h 溶解率为 31%且最终溶解率达到 100%。因此,选择 3 号纤维用于暂堵分段酸压的暂堵材料。

2.2 暂堵压力评价

在线性材料中加入合适直径的颗粒有利于架桥,并可提高暂堵强度。因此,暂堵段塞采用“线性纤维+颗粒”的复合物,根据缝宽大小确定颗粒直径^[18],当缝宽为 2.0 mm 时,可选用直径为 1.0 mm 的颗粒与纤维进行复合暂堵。

2.2.1 试验方法

采用工作液动态滤失仪(见图 2)进行试验,试验步骤为:1)配制好压裂液,将不同质量分数的长 6~8 mm 的纤维及直径 1.0 mm 的颗粒混入压裂液中,装入搅拌池;2)在岩心夹持器中放入具有不同宽度(宽度为 2.0 和 3.0 mm)裂缝的岩心;3)开始驱

替,监测注入压力,以评价其暂堵压力。驱替后的岩心如图 3 所示。

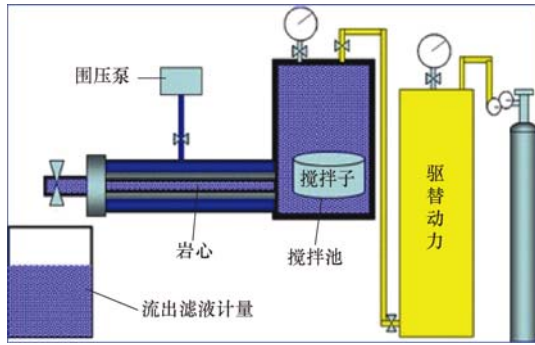


图 2 工作液动态滤失仪

Fig. 2 Dynamic filter for fracturing fluid

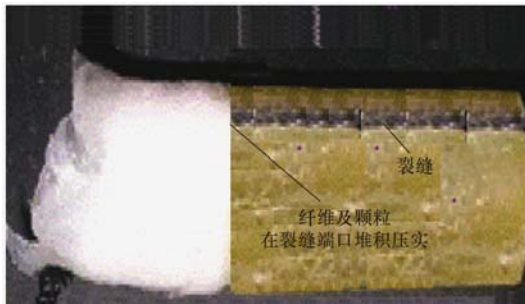


图 3 驱替后带裂缝岩心

Fig. 3 Core with cracks after displacement

2.2.2 试验结果

缝宽分别为 2.0 和 3.0 mm 时,不同质量分数的纤维及颗粒复合的暂堵压力见表 1。

表 1 不同质量分数纤维及颗粒复合的暂堵压力

Table 1 Temporary plugging pressure produced by different fibers and particle mass fraction

缝宽/mm	纤维质量分数, %	颗粒质量分数, %	暂堵压力/MPa
2.0	1.0	0.1	5.9
		0.3	6.8
		0.5	9.1
	2.0	0.1	6.3
		0.3	7.0
		0.5	10.0
3.0	2.0	0.5	不能有效暂堵

由表 1 可知:质量分数为 1.0%~2.0% 的纤维+质量分数为 0.5% 的颗粒组合其暂堵压力大于 9 MPa,可用于塔河油田产层的暂堵分段酸压,但现场施工时需降低注入排量,将裂缝缝宽控制在 2.0 mm 以内,以保证暂堵效果。

3 现场应用

塔河油田碳酸盐岩油藏水平井暂堵分段酸压技术在该油田应用 8 井次,施工暂堵压力 6.6~9.0 MPa,累计增油 5.6×10^4 t,有效提高了长裸眼水平井的“甜点”动用率,对于裸眼井段周围存在多个“甜点”的水平井有很好的适应性,能大幅度提高单井改造后的产能,并降低施工费用。下面以塔河油田 A 井为例介绍该技术的现场应用情况。

3.1 A 井概况

A 井位于断溶破碎带,裸眼井段长 355.00 m,测井解释和井筒应力剖面显示该井段存在 3 个对应的“甜点”,有必要进行分段酸压提高井段动用率,且“甜点”之间的应力差为 6~7 MPa,适合采用“纤维+颗粒”复合暂堵分段,因此设计 2 个暂堵段塞分 3 段进行酸压。

3.2 压裂液及酸液用量优化

A 井 3 个“甜点”处储集体与井筒的距离分别为 93.00, 98.00 和 87.00 m,采用压裂模拟软件 FracproPT 对施工压裂液及酸液用量进行了模拟优化,结果见表 2。

表 2 不同压裂液及酸液用量下的裂缝长度模拟结果

Table 2 Simulation results for crack lengths with different fracturing fluid and acid volumes

压裂液注入量/m ³	高温胶凝酸注入量/m ³	动态缝长/m	有效缝长/m	导流能力/(D·cm)
200	200	118.10	95.00	322.0
250	200	121.00	97.00	311.0
250	240	122.90	101.00	362.0
250	280	124.50	103.00	334.0
300	280	126.00	105.00	371.0

由表 2 可知:当采用 250 m³ 压裂液+240 m³ 胶凝酸时,有效缝长达 101.00 m,可有效沟通 3 个“甜点”处的储集体,因此确定每一段的用液量为 250 m³ 压裂液+240 m³ 胶凝酸。

3.3 暂堵段塞设计

采用 3 层暂堵:1)采用转向酸进行预充填暂堵,转向酸与岩石反应形成凝胶,室内测得转向酸比常规稠化酸暂堵压力高 2.0 MPa(见图 4);2)采用质量分数为 1.0%、长度为 6~8 mm 的纤维与质量分

数为 0.5%、直径为 1.0 mm 的颗粒形成主暂堵层(暂堵压力试验结果见图 5);3)采用质量分数为 1.0% 的纤维在缝口压实形成致密低渗层,不仅有一定的暂堵效果,还可防止主暂堵层中的颗粒返排。

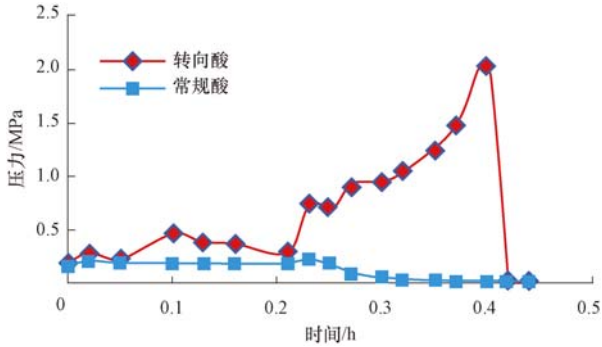


图 4 转向酸暂堵压力试验结果

Fig. 4 Test results for temporary plugging pressures with diverting acid

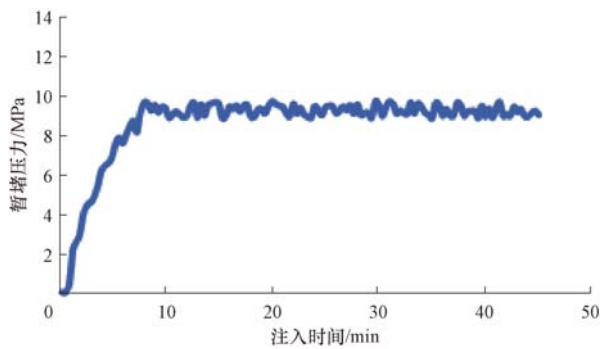


图 5 1.0%纤维+0.5%颗粒的暂堵压力试验结果

Fig. 5 Test results for temporary plugging pressures with 1.0% fiber and 0.5% particles

3.4 暂堵排量优化

根据 2.2.2 的试验结果,施工中需要控制排量,保证裂缝宽度在 2.0 mm 以下。采用压裂软件 FracproPT 模拟了不同排量下的缝宽,结果如图 6 所示。

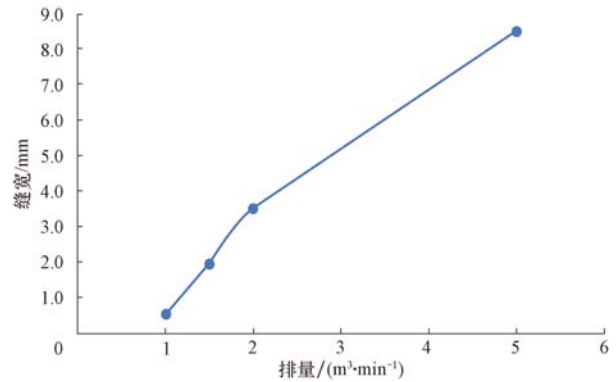


图 6 不同排量下的缝宽

Fig. 6 The crack width under different flow rates

从图 6 可以看出:当排量为 1.5 m³/min 时,缝宽为 2.0 mm。因此,确定施工时纤维及颗粒暂堵段塞排量小于 1.5 m³/min,以利于暂堵。

3.5 施工概况

A 井奥陶系一间房组 6 980.00~7 335.00 m 井段分 3 段进行了酸压施工,施工规模 1 735.0 m³,加入纤维 1.4 t,加入颗粒 0.3 t,停泵 20 min,压力从 4.0 MPa 降至 3.6 MPa(见图 7),压裂后日产油 108.3 t。

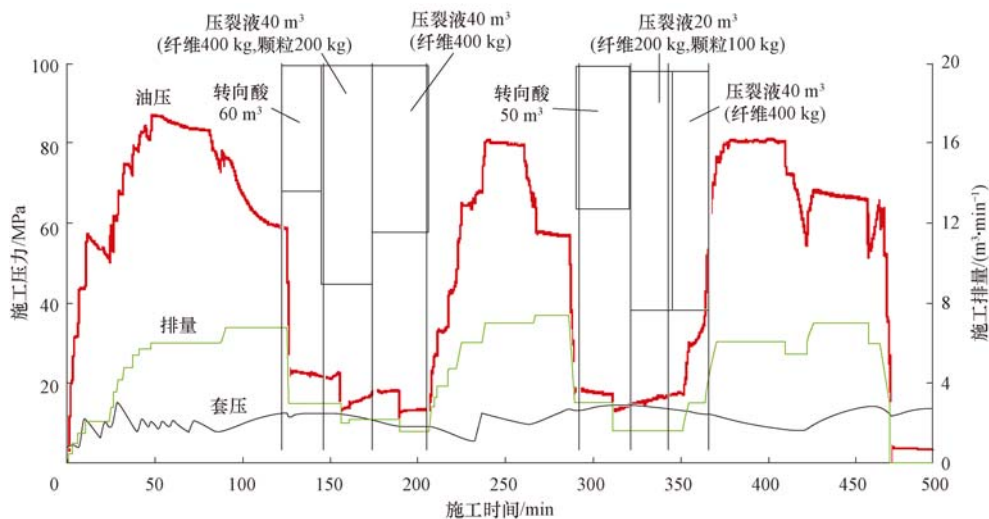


图 7 A 井分段酸压施工曲线

Fig. 7 Operation curve of sectional acid fracturing in the Well A

第一暂堵段塞注入后,在排量不变的情况下,井口压力增加 6.6 MPa;第二暂堵段塞注入后,在排量不变的情况下,井口压力增加 7.0 MPa,显示出良好的暂堵效果。采用 FracproPT 进行了 G 函数拟合,显示存在 3 条不同的裂缝滤失及张开闭合。根据施工曲线计算,3 段延伸压力梯度分别为 0.015 6, 0.013 3 和 0.014 4 MPa/m,显示沟通 3 套不同的储集体。以上结果表明,A 井暂堵分段酸压施工成功。

3.6 效果分析

邻井 B 井、C 井的振幅变化率与 A 井相似(见图 8),且地震剖面显示均为“杂、乱、弱”的反射特征(见图 9)。B 井、C 井采用笼统酸压后,初期用 $\phi 4.0$ mm 油嘴自喷生产,日产油量分别为 61.0 和 65.0 t。A

井进行暂堵分段酸压后,初期用 $\phi 4.0$ mm 油嘴自喷生产,日产油量 108.3 t,比 B 井和 C 井分别高 77.5% 和 66.6%。

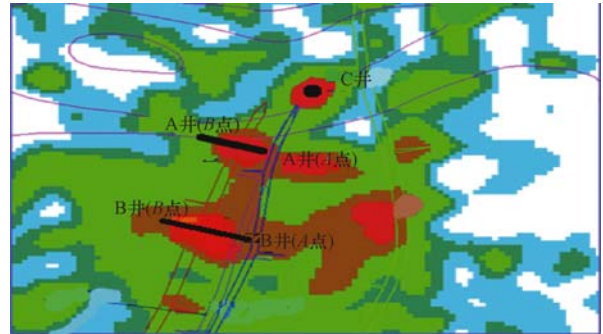


图 8 A 井、B 井和 C 井的振幅变化率

Fig. 8 Amplitude variation rate of the Well A, B and C

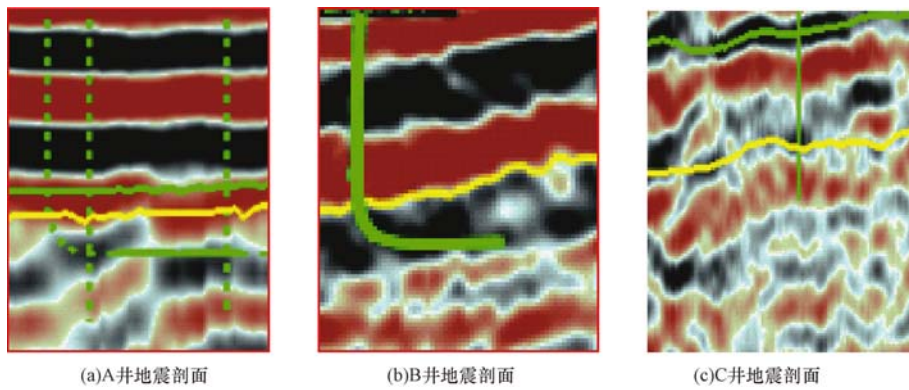


图 9 A 井、B 井和 C 井地震剖面反射特征

Fig. 9 Features of seismic reflection in the Well A, B and C

邻井 D 井采用“封隔器+滑套”分 3 段酸压,总费用 1 134 万元,而采用“纤维+颗粒”暂堵分段酸压的 A 井总费用仅 592 万元,费用降低 47.8%。A 井暂堵分段酸压效果表明,水平井暂堵分段酸压技术具有较大的增油及经济优势。

4 结 论

1) 塔河油田碳酸盐岩储层压裂起裂压力差主要集中在 5~9 MPa,试验显示质量分数 1.0%~2.0%、长度为 6~8 mm 的纤维+质量分数为 0.5%、直径为 1.0 mm 的颗粒复合时暂堵压力大于 9 MPa,可满足该油田暂堵分段酸压的需求。

2) 现场应用表明,塔河油田碳酸盐岩油藏水平井暂堵分段酸压技术具有显著的增油效果及较好的经济效益。

3) 水平井暂堵分段酸压技术可实现无井下分段工具分段酸压,解决了塔河油田碳酸盐岩水平井

工具下入困难和后期处理难度大等问题,并具有施工风险低、周期短等优势。

参 考 文 献

References

[1] 荣元帅,赵金洲,鲁新便,等. 碳酸盐岩缝洞型油藏剩余油分布模式及挖潜对策[J]. 石油学报,2014,35(6):1138-1146.
RONG Yuanshuai, ZHAO Jinzhou, LU Xinbian, et al. Remaining oil distribution patterns and potential-tapping countermeasures in carbonate fracture-cavity reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(6): 1138-1146.

[2] 房好青. 塔河油田后置砂酸压技术研究[J]. 石油地质与工程, 2015, 29(5): 113-115.
FANG Haoqing. Research on rear sand acid fracturing technology in Tahe Oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2015, 29(5): 113-115.

[3] 王雷. 碳酸盐岩小跨度控缝高压技术新进展[J]. 钻采工艺, 2015, 38(4): 47-50.
WANG Lei. Small span fracture height control technology in carbonate reservoir acidizing[J]. Drilling & Production Tech-

- nology, 2015, 38(4): 47-50.
- [4] 谢远伟, 罗纯, 耿宇迪. 超大型酸压工艺技术在重复酸压中的应用[J]. 断块油气田, 2011, 18(6): 805-808.
XIE Yuanwei, LUO Chun, GENG Yudi. Application of ultra-large-scale acid fracturing technology in acid refracturing[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(6): 805-808.
- [5] 贾光亮, 张飞洲, 梁护站. 塔河油田超大规模复合酸压技术[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(6): 78-81.
JIA Guangliang, ZHANG Feizhou, LIANG Huzhan. Application and analysis of large scale composite acid fracturing technology in Tahe Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(6): 78-81.
- [6] 孟莲香, 刘红星, 姜勇. 水平井酸化暂堵转向施工工艺优化研究[J]. 钻采工艺, 2013, 36(5): 100-103.
MENG Lianxiang, LIU Hongxing, JIANG Yong. The research of temporary plugging segmentation acidizing of horizontal well[J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(5): 100-103.
- [7] 李中林, 闫明发, 毛秀玲. 塔河油田碳酸盐岩油藏酸压工艺技术研究[J]. 吐哈油气, 2003, 8(4): 350-353.
LI Zhonglin, YAN Mingfa, MAO Xiuling. The research of acid-fracturing technology of Tahe Oilfield carbonate reservoir[J]. Tuha Oil and Gas, 2003, 8(4): 350-353.
- [8] 李春月, 张焯, 宋志峰, 等. 碳酸盐岩地震弱反射区水平井分段酸压技术[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(6): 716-718.
LI Chunyue, ZHANG Ye, SONG Zhifeng, et al. Technology of horizontal well segmentation acid fracturing in weak reflection carbonate reservoir[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(6): 716-718.
- [9] 陶碧娥, 王辉辉, 龙武, 等. 塔河油田奥陶系储层水平井分段技术探讨[J]. 油气井测试, 2014, 23(2): 53-55.
TAO Bi'e, WANG Huihui, LONG Wu, et al. The discussion of horizontal well segmentation methods of carbonate reservoir in Tahe Oilfield[J]. Well Testing, 2014, 23(2): 53-55.
- [10] 韩涛, 李怀杰, 樊勇杰. 水平井裸眼分段压裂比肩国际领先[J]. 石油与装备, 2012, 42(1): 62-63.
HAN Tao, LI Huaijie, FAN Yongjie. Segmentation fracturing of naked hole horizontal well leading international[J]. Petroleum & Equipment, 2012, 42(1): 62-63.
- [11] 肖晖, 郭建春, 曾俊. 缝洞型碳酸盐岩储层水平井分段酸压技术研究[J]. 断块油气田, 2011, 18(1): 119-122.
XIAO Hui, GUO Jianchun, ZENG Jun. The research of segmentation acid-fracturing technology of fracture-vug carbonate reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(1): 119-122.
- [12] 北京卓辰基业技术开发有限公司. 水溶性压裂酸化暂堵剂: 200410009408. 1[P]. 2005-03-23.
Beijing Zhuochen Inheritance Technology Development Corporation. Water-soluble fracture acidizing diverting agent: 200410009408. 1[P]. 2005-03-23.
- [13] 中国石油化工股份有限公司. 酸压暂堵剂: 201110330609. 1[P]. 2012-07-25.
China Petroleum and Chemical Corporation. Acid fracturing diverting agent: 201110330609. 1[P]. 2012-07-25.
- [14] 王兰, 吴琦, 黄述春. 多级架桥暂堵技术在安岳地区的应用[J]. 钻采工艺, 2012, 35(5): 101-103.
WANG Lan, WU Qi, HUANG Shuchun. The application of multistage bridge plugging technology in Anyue Area[J]. Drilling & Production Technology, 2012, 35(5): 101-103.
- [15] 杨建委, 郑波. 纤维暂堵转向酸压技术研究及其现场试验[J]. 石油化工应用, 2013, 32(12): 34-36.
YANG Jianwei, ZHENG Bo. The research and application of fiber temporary plugging acid fracturing technology[J]. Petrochemical Industry Application, 2013, 32(12): 34-36.
- [16] 杨伟, 李红英, 吴正伟. 自生泡沫暂堵酸化技术及在长庆油田的应用[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(10): 313-314.
YANG Wei, LI Hongying, WU Zhengwei. The application of self-production foam temporary plugging segmentation acidizing technology in Changqing Oilfield[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(10): 313-314.
- [17] 钟森, 任山, 黄禹忠. 元坝海相超深水平井均匀布酸技术研究及应用[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(6): 83-86.
ZHONG Sen, REN Shan, HUANG Yuzhong. The research and application of acid well-distributed of marine sediment extra-deep horizontal well in Yuanba Area[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(6): 83-86.
- [18] 张敏琴, 谢政, 扈福堂. 砾石充填防砂工艺中的砾石尺寸选择方法[J]. 青海石油, 2006, 24(4): 76-78.
ZHANG Minqin, XIE Zheng, HU Futang. The method of gravel size selection for sand control[J]. Qinghai Shiyou, 2006, 24(4): 76-78.

[编辑 令文学]