

免钻桥塞在致密气藏储层改造中的适应性评价

夏富国¹, 夏玉琴², 张冲¹, 高春华¹

- 1. 中国石油化工集团公司东北油气分公司 吉林长春 130062
- 2. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司第二采气厂 陕西榆林 719000

通讯作者:Email:272697135@qq.com
项目支持:中国石化科技部项目“重点地区致密储层特征与改造技术研究”(P15118)

引用:夏富国, 夏玉琴, 张冲, 等. 免钻桥塞在致密气藏储层改造中的适应性评价[J]. 油气井测试, 2018, 27(6):63-67.
Cite: XIA Fuguo, XIA Yuqin, ZHANG Chong, et al. Feasibility evaluation of drill-free bridge plug in stimulation of tight gas reservoirs [J]. Well Testing, 2018, 27(6):63-67.

摘要 可钻式复合桥塞内口径小, 压后需磨铣桥塞, 连续油管钻塞费用高、作业周期长, 严重影响了水平井的投产进度。大通径免钻桥塞内口径大、压裂球可溶, 现场实施简便、经济可靠。结合区域储层流体特征, 开展压裂球的室内溶蚀评价实验, 压裂球在清水中不溶蚀, 在压裂液和返排液中易溶蚀, 温度越高溶蚀越快。根据室内实验结果, 优化桥塞泵送工艺, 采用活性水泵送桥塞, 再采用清水作隔离液, 控制可溶球的溶蚀速度。将大通径免钻桥塞应用在松辽盆地凝析气藏水平井 X 井的 6 段压裂中, 累计泵入液体 4 760 m³, 支撑剂 354 m³, 顺利完成了水平井各段的储层改造。现场试验表明, 大通径桥塞工具坐封可靠, 压后返排中压裂球溶蚀彻底, 满足压裂施工要求, 能大幅缩短水平井投产周期, 在致密气藏储层改造中具有良好的推广价值。
关键词 致密气藏; 水平井; 免钻桥塞; 大通径桥塞; 压裂改造; 可溶球; 溶蚀速度; 泵送工艺
中图分类号: TE353 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.06.011

Feasibility evaluation of drill-free bridge plug in stimulation of tight gas reservoirs

XIA Fuguo¹, XIA Yuqing², ZHANG Chong¹, GAO Chunhua¹

- 1. SINOPEC Northeast Oil and Gas Company, Changchun, Jilin 130062, China
- 2. No.2 Gas Production Plant of PetroChina Changqing Oilfield Company, Yulin, Shaanxi 719000, China

Abstract: The drillable composite bridge plug with the characteristic of small diameter needs bridge plug milling using coiled tubing after the fracturing, which seriously affects the production schedule of the horizontal well due to the high cost and long operation period. The large-bore drill-free bridge plug has a large drift diameter and dissoluble fracturing ball, featuring with simple onsite application, cost effectiveness and reliability. Based on the fluid characteristics of the regional reservoir, indoor corrosion evaluation experiment of fracturing balls was carried out. The fracturing ball do not dissolve in the clear water, and is easily dissolved in the fracturing fluid and the flowback fluid and higher temperature results in faster dissolution. According to the results of laboratory experiments above, the bridge plug pumping process was optimized. Active water is used to pump the bridge plug, and the clear water is used as the isolation fluid to control the dissolution rate of the dissoluble ball. The large-bore drill-free bridge plug was applied to the six-stage horizontal well fracturing of Well X in the condensate gas reservoir in South of Songliao, with the cumulative pumping liquid of 4 760 m³ and the proppant of 354 m³, resulting in successful stimulation of each stage of the horizontal well. Field tests show that the large-bore bridge plug tool is reliable, and the fracturing ball indicated by flowback is completely dissolved, which meets the requirements of fracturing operation, and can greatly shorten the putting-to-production time of horizontal well, presenting a good promotion prospect in the stimulation of tight gas reservoirs.
Keywords: tight gas reservoir; horizontal well; drill-free bridge plug; large-bore bridge plug; fracturing; dissoluble ball; dissolution rate; pumping process

水平井分段压裂是低渗油气资源开发的重要措施, 分段工具/工艺也从最初的管外封隔、有限级逐步向管内封隔、无限级发展。靳宝军^[1]结合东北工区储层特点重点对比分析了裸眼封隔器+滑套水力喷射, 两种水平井分段工艺的优缺点, 优选出适合浅层水平井压裂的分段工艺。伊西锋^[2]、彭成勇^[3]重点分析了水平井泵送桥塞、固井投球滑套、连续油管拖动封隔器等管内多级分段压裂工艺, 指

出泵送桥塞分段压裂工艺是最具潜力的储层改造的关键技术。无限极套管固井滑套分段压裂具有施工效率高、满足致密储层大排量施工的技术优点,但现场实践中滑套无法正常开启、耽误施工进度,限制了它的推广应用^[4-5]。连续油管拖动封隔器多级分段压裂技术采用连续油管喷砂射孔,油套环空加砂压裂,管柱底部带有封隔器,可进行有效分段,完成多段压裂施工。该分段工艺不受压裂段数限制,可连续施工,施工周期短。它特有优势是可实时监测井底压力,降低施工风险。由于采用连续油管作业,施工井深和排量受限,且施工费用较高,同时封隔器、喷砂工具需多次重复使用,井下工具性能要求高。因此连续油管拖动分段压裂技术适用于较薄储层、中小规模改造的油气层^[2,6-7]。泵送桥塞分段压裂工艺采用桥塞+射孔联作的方式实施分段压裂,压后可直接投产或钻掉所有桥塞恢复井筒通畅后投产^[8-10]。由于采用套管压裂满足高排量、大规模施工要求,它特有的工艺优势是每段内可多簇射孔,利于形成体积缝,是致密油气、页岩油气水平井主流的分段压裂改造方式。

随着工艺的发展,桥塞分级能力从最初的 2 级发展到目前的无限级^[11-12];桥塞口径也从小发展到大,甚至全通径^[13];材料从易钻磨的复合材料发展到易溶全可溶材料^[14-15]。传统的可钻式复合桥塞,由于其内通径小,压裂后需要进行钻磨作业,才能满足后期生产测试的要求^[16-18],而采用连续油管钻塞作业费用高、周期长,且存在钻塞用压井液对储层的伤害、钻屑对地面管汇及设备的卡堵风险^[19]。目前全可溶桥塞也在不断的试验应用,但由于其溶蚀受井况影响较大(如储层温度、流体性质等),现场应用效果不理想。通过总结分析水平井泵送桥

塞应用情况^[20-23],发现大通径免钻桥塞具有内通径大、球可溶,经济性良好、现场应用广的特点。通过开展室内及现场评价,旨在形成适合本区域流体性质与储层特点的大通径免钻桥塞分段工艺,缩短单井投产周期,降低投资。

1 免钻桥塞性能评价

桥塞性能评价应包括承压强度、密封性、压裂球溶蚀等^[24-25]。针对油田实验室设备能力 & 大通径桥塞的技术特点,室内侧重开展压裂球溶蚀实验。

1.1 桥塞性能参数

贝克大通径桥塞采用投球的方式实现水平井的分段,主要包括两部分(图 1):桥塞本体为碳钢,强度大于复合桥塞;可溶球为电镀金属材质,强度与钢接近,密度与铝相似。大通径桥塞具体技术参数如下:适用外径为 139.7 mm 的套管;工具长 560.1 mm、外径 111.3 mm、内径 69.9 mm;耐压等级 70 MPa;工作温度 37~177 ℃;压裂球直径为 82.5 mm。



图 1 大通径桥塞本体及可溶球
Fig.1 Large-bore bridge plug and fracturing ball

1.2 压裂球溶蚀实验评价

压裂球采用电镀材料,溶蚀主要受温度、离子浓度的影响,因此实验方案充分考虑了实验条件、压裂球及水平井施工工艺特点,重点评价不同工况下压裂球的质量损失率。不同流体的液体性质见表 1,实验方案及结果见表 2。

表 1 不同流体的液体性质
Table 1 Properties of different fluids

流体类型	离子含量/(mg·L ⁻¹)							pH	矿化度/ (mg·L ⁻¹)
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ /K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻		
清水	44	10	11	13	5	153	15	7	251
压裂液	648	531	9 538	6 244	15	3 256	1 350	10	21 582
返排液	1 002	365	7 605	5 934	150	3 432	1 125	6	19 631

表 2 不同试验条件下可溶球溶蚀实验
Table 2 Dissolution tests of dissoluble ball under different test conditions

介质	实验温度/ ℃	初始质量/ g	质量损失率/%						
			4 h	8 h	12 h	16 h	20 h	24 h	
清水	25	5.9187	0	0	0	0	0	0	
压裂液	25	5.8673	6	34	58	75	87	93	
(基液)	95	5.9286	51	95	100	—	—	—	
返排液	95	5.9423	6	34	70	89	93	100	

实验结果显示压裂球在清水中基本不溶蚀;在压裂液中溶蚀,且温度越高,溶蚀速度越快,在 95 ℃压裂液中 12 h 内溶蚀彻底;压裂球在返排液中的溶蚀速度较快,一天内溶蚀彻底。

1.3 评价结果

从压裂球的溶蚀实验可以看出,压裂球在压裂

液基液、压裂返排液中具有较强的溶蚀能力,在清水中基本不溶蚀。通过合理优化施工工艺,既能实现压裂施工段的有效封隔,又能实现压后排液阶段的快速溶蚀,满足现场施工要求。

2 免钻桥塞现场试验

X 井位于吉林省长岭县内,井深 4 078 m,垂深 3 250 m,水平段长 690 m,最大井斜 81°,油层套管采用外径 139.7 mm、壁厚 9.17 mm 的 P110 套管。

该井是一口凝析气藏水平井,工艺要求分段压裂改造后水平段需要较大的流动通道,同时考虑到常规可钻桥塞压裂后钻塞周期长、工程费用高,因此该井开展大通径免钻桥塞分段压裂试验。

2.1 泵送工艺优化

为了保证施工的安全性、可操作性,结合压裂球室内溶蚀评价试验,针对性开展了压裂球泵送工

艺优化。具体措施为:①前一段压裂施工结束后,采用活性水泵送桥塞到指定位置,保证后期送球过程中入井液与地层流体的匹配;②压裂球入井前后各泵入 5~10 m³ 清水作为隔离液,保证压裂球在施工过程中不溶蚀;③若压裂段需进行酸处理,要求桥塞位置距离压裂点 30 m 以上,且酸处理前后需泵入适量清水作为隔离液,避免酸液与可溶球接触。

2.2 现场实验情况

X 井分六段压裂,累计泵入液体 4 760 m³,支撑剂 354 m³,顺利完成了水平井各段的储层改造。从该井的送球及压裂施工曲线来看(图 2),压裂球到球座位置后,均存在明显的压力响应特性。各段压裂球到位后的压力响应及采取的措施见表 3。从各段的压力响应特征、停泵压力均反映出免钻桥塞成功实现了水平井的压裂分段。整个水平井各段施工顺利,证实了大通径免钻桥塞能够满足现场要求。

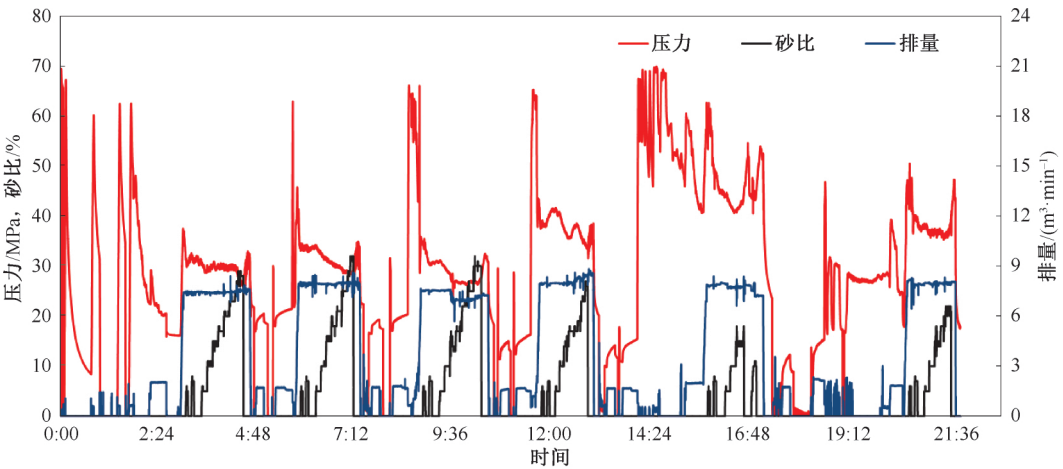


图 2 X 井送球及压裂施工曲线
Fig.2 ball pumping and fracturing curve of Well X

表 3 压裂球到位后的压力响应特征及对应措施
Table 3 Pressure response characteristics and corresponding measures after the fracturing ball is in place

压裂段数	球到位后的压力显示特征	采取措施	停泵压力/MPa
第一段	未投球	酸处理	22.0
第二段	21 MPa 升至 65 MPa 后,迅速降至 23 MPa	提排量	23.0
第三段	20 MPa 升至 66 MPa 后,压力缓慢降低	持续泵入、逐步提排量	21.0
第四段	16 MPa 升至 63 MPa,维持 6 min 后降至 40 MPa	提排量	25.0
第五段	16 MPa 升至 70 MPa,超压,多次试挤后,维持 66 MPa	酸处理	34.0
第六段	15 MPa 升至 45 MPa 后降至 30 MPa	酸处理(因现场酸液无法回收)	26.2

2.3 压后排液

压裂结束后关井 2 h,用油嘴控制排液,排液过程中未捕获到可溶球的残渣。排液 48 h 后压力降至 5 MPa,井口见气。采用平推法压井后下 $\phi 60.3$ mm 小油管投产,投产初期油压 22 MPa,日产天然气 7×10^4 m³,日产凝析油 32.8 t,改造效果明显。

2.4 推广应用与经济效益

以水平井分压 6 段为例,“大通径桥塞+可溶球”分段压裂技术,与常规可钻复合桥塞相比,单井投产周期平均缩短 6 d,节约作业费用 43 万元,降本效果显著。2016 年 6 月现场试验成功以后,免钻桥塞在油田进行推广应用,截止 2018 年 7 月,累计成功应用 35 口井 267 段,节约投资近 1 600 余万元,创造了良好经济效益。

3 结论

(1)大通径免钻桥塞具有内通径大,压裂球可溶的特点,压裂后无需钻塞,能满足压后生产测试的作业要求。

(2)压裂球在压裂液基液及压裂返排液中的溶蚀速度较快,在清水中不溶蚀。温度越高压裂球的溶蚀速度越快,可根据现场需求优化工艺、控制可溶球的溶蚀速度。

(3)现场应用证实大通径免钻桥塞具有足够的强度、良好的密封性,能够满足压裂施工的要求。

(4)大通径免钻桥塞因其内通径大,无需钻塞的特点,与常规可钻桥塞相比,提高了施工效率,节约了投资,有良好的推广价值。

致谢:感谢中石化东北油气分公司石油工程研究院对本文发表提供的支持,且该文已通过单位保密审查。

参考文献

- [1] 靳宝军. 东北工区水平井分段压裂技术研究[J]. 钻采工艺, 2015, 38(2): 63-66.
JIN Baojun. Research on staged fracturing technology for horizontal well in northeast China area [J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(2): 63-66.
- [2] 伊西锋. 非常规油气水平井管内多级分段压裂新技术[J]. 石油机械, 2014, 42(4): 62-66.
YI Xifeng. New technology of multistage staged fracturing for unconventional oil-gas horizontal well [J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(4): 62-66.
- [3] 彭成勇. 页岩油气水平井压裂工艺技术展望[J]. 天然气勘探与开发, 2014, 37(1): 68-71.
PENG Chengyong. Fracturing technologies used for shale-oil and shale - gas horizontal wells [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2014, 37(1): 68-71.
- [4] 杨永青, 王治华, 王磊, 等. 无限级滑套压裂新工艺在苏里格气田的应用[J]. 钻采工艺, 2015, 38(1): 62-63, 75.
YANG Yongqing, WANG Zhihua, WANG Lei, et al. Application of infinite stage sliding sleeve fracturing technology in Sulige gas field [J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(1): 62-63, 75.
- [5] 肖元相, 来轩昂, 周长静, 等. 长庆气田套管滑套压裂技术的研究与应用[J]. 钻采工艺, 2015, 38(4): 61-64.
XIAO Yuanxiang, LAI Xuan'ang, ZHOU Changjing, et al. Research and application of casing sleeve fracturing technology in Changqing gas field [J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(4): 61-64.
- [6] 李立政, 卢秀德, 孙兆岩. 连续油管分段压裂技术在低渗透油气藏中的应用实践[J]. 钻采工艺, 2015, 38(2): 78-81.

- LI Lizheng, LU Xiude, SUN Zhaoyan. Application of coiled tubing staged fracturing technology in low - permeability reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(2): 78-81.
- [7] 韩继勇, 逢仁德, 王书宝, 等. 水力喷射环空压裂技术在长庆油田的应用[J]. 钻采工艺, 2015, 38(1): 48-50.
HAN Jiyong, PANG Rende, WANG Shubao, et al. Application of hydraulic jet annulus sand-filled fracturing technology in Changqing Oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(1): 48-50.
- [8] 侯光东, 陈飞, 刘达. 水力泵送桥塞压裂技术在长庆油田的应用[J]. 钻采工艺, 2015, 38(2): 54-56.
HOU Guangdong, CHEN Fei, LIU Da. Application of hydraulic pumping bridge plug fracturing technology in changing oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(2): 54-56.
- [9] 李军贤. 泵送桥塞射孔联作技术在水平井的应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(6): 56-57, 61.
LI Junxian. Application of combined operation tech of bridge plug delivered by pump and perforation in horizontal well [J]. Well Testing, 2017, 26(6): 56-57, 61.
- [10] 李博博, 蒋龙, 韩焘, 等. 水力泵送桥塞-射孔联作压裂技术在长庆油田的规模应用[J]. 国外测井技术, 2017, 38(1): 45-47.
LI Bobo, JIANG Long, HAN Tao, et al. Application of combined operation tech of bridge plug delivered by hydraulic pump and perforation fracturing technology in changing oilfield [J]. World Well Logging Technology, 2017, 38(1): 45-47.
- [11] 谢建华, 刘崇江, 赵骊川, 等. 桥塞压裂工艺技术[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 34(3): 38-39, 91.
XIE Jianhua, LIU Chongjiang, ZHAO Lichuan, et al. Bridge plug fracturing technique [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 34(3): 38-39, 91.
- [12] 郑立军, 才博, 冉风华, 等. 致密油储层改造技术研究与应用[J]. 油气井测试, 2015, 24(1): 4-7.
ZHENG Lijun, CAI Bo, RAN Fenghua, et al. Research on transformation technology of tight oil reservoir and its application [J]. Well Testing, 2015, 24(1): 4-7.
- [13] 陈海力, 邓素芬, 王琳, 等. 蜀南地区储层分段压裂改造技术新进展及应用[J]. 钻采工艺, 2015, 38(5): 52-54.
CHEN Haili, DENG Sufen, WANG Lin, et al. Progress and application of staged fracturing techniques in Sichuan Shunan gas field [J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(5): 52-54.
- [14] 李敢, 伊西峰, 姜广彬, 等. 国外全通径分段压裂完井技术进展及趋势[J]. 钻采工艺, 2015, 38(4): 41-44.
LI Gan, YI Xifeng, JIANG Guangbin, et al. Development trend of foreign fullbore staged fracturing completion technology [J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38

- (4):41-44.
- [15] 刘辉,王宇,严俊涛,等.可溶性桥塞性能测试系统研制与应用[J].石油机械,2018,46(10):83-86.
LIU Hui, WANG Yu, YAN Juntao, et al. Development and application of dissoluble bridgeplug performance test system [J]. China Petroleum Machinery, 2018,46(10): 83-86.
- [16] 曾雨辰,杨保军,王凌冰.涪页HF-1井泵送易钻桥塞分段大型压裂技术[J].石油钻采工艺,2012,34(5):75-79.
ZENG Yuchen, YANG Baojun, WANG Lingbing. Large-scale staged fracturing technology with pump-down drillable bridge plug for well Fuye HF-1 [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012,34(5):75-79.
- [17] 周长静,张燕明,周少伟,等.苏里格致密砂岩气藏水平井体积压裂技术研究与试验[J].钻采工艺,2015,38(1):44-47.
ZHOU Changjing, ZHANG Yanming, ZHOU Shaowei, et al. Study and experiment on volumetric fracturing technology of horizontal well for Sulige tight sandstone gas reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(1):44-47.
- [18] 逢仁德,高健明,崔莎莎.水力泵送桥塞分段多簇体积压裂技术在AP959井的应用[J].石油地质与工程,2015,29(4):125-128.
PANG Rende, GAO Jianming, CUI Shasha. Application of combined operation tech of bridge plug delivered by pump and perforation in horizontal well [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2015,29(4):125-128.
- [19] 陆峰,潘登.页岩气藏体积压裂后地面连续捕屑除砂排液工艺[J].钻采工艺[J].2015,38(5):49-51.
LU Feng, PAN Deng. Continuous debris capture, desanding and flowback technology after volume fracturing in shale gas reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2015,38(5):49-51.
- [20] 陈海力,邓素芬,王琳,等.免钻磨大通径桥塞技术在页岩气水平井分段改造中的应用[J].钻采工艺,2016,39(2):123-125.
CHEN Haili, DENG Sufen, WANG Lin, et al. Application of drill-free large-diameter bridge plug technology in segmental reconstruction of shale gas horizontal wells [J]. Drilling & Production Technology, 2016,39(2):123-125.
- [21] 周小林,高志华,张冲.龙凤山气田大通径免钻桥塞分段压裂先导试验[J].油气井测试,2018,27(1):62-67.
ZHOU Xiaolin, GAO Zhihua, ZHANG Chong. Pilot tests of staged fracturing involving large-diameter drill-free bridge plugs in the Longfengshan gas field [J]. Well Testing, 2018,27(1):62-67.
- [22] 张毅,于丽敏,仁勇强,等.一种新型可降解压裂封隔器坐封球[J].油气井测试,2018,27(2):53-58.
ZHANG Yi, YU Limin, REN Yongqiang, et al. A new type of degradable setting ball for fracturing packers [J]. Well Testing, 2018,27(2):53-58.
- [23] 刘运楼,李斌,潘勇,等.分层压裂用可溶球的研制[J].天然气工业,2016,36(9):96-101.
LIU Yunlou, LI Bin, PAN Yong, et al. Research and development of soluble ball for staged fracturing [J]. Natural Gas Industry, 2016,36(9):96-101.
- [24] 王林,张世林,平恩顺,等.分段压裂用可降解桥塞研制及其性能评价[J].科学技术与工程,2017,17(24):228-232.
WANG Lin, ZHANG Shilin, PING Enshun, et al. Development and performance evaluation of the degradable bridge plug for staged fracturing [J]. Science Technology and Engineering, 2017,17(24):228-232.
- [25] 王林,平恩顺,张建华,等.可降解桥塞研制及其承压性能试验[J].石油机械,2017,45(2):64-67.
WANG Lin, PING Enshun, ZHANG Jianhua, et al. Development and pressure bearing performance experiment of the degradable bridge plug [J]. China Petroleum Machinery, 2017,45(2):64-67.

编辑 穆立婷

第一作者简介:夏富国,男,1985年10月出生,硕士,工程师,2011年毕业于西南石油大学油气田开发专业,现主要从事储层改造研究工作。电话:0431-88531856,18686675410; Email:272697135@qq.com。通信地址:吉林省长春市和平大街660号,邮政编码:130062。