



渤海油田鱼骨刺形多分支孔增产技术现场试验

苏建 窦蓬 崔国杰 祝国伟 钟声

Field Test of Fishbone Multi-Branch Hole Stimulation Technology in Bohai Oilfield

SU Jian, DOU Peng, CUI Guojie, ZHU Guowei, ZHONG Sheng

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2022050>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

羽状分支管增产工具设计与试验

Design and Testing of the Stimulation Tool for Pinnate Branch Tubes

石油钻探技术. 2020, 48(4): 72–77 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020061>

渤海油田分层注水井电缆永置智能测调关键技术

Cable Implanted Intelligent Injection Technology for Separate Injection Wells in Bohai Oilfield

石油钻探技术. 2019, 47(3): 133–139 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019044>

渤海油田稠油水平井防砂筛管耐温能力的确定

Determination of the Temperature Resistance Capacity of Sand Control Screen Liner in Horizontal Heavy Oil Wells in the Bohai Oilfield

石油钻探技术. 2018, 46(6): 65–70 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018010>

渤海油田注水井延效酸化技术研究与应用

Research and Application of Prolonged-Effect Acidizing Technology for Water Injection Wells in the Bohai Oilfield

石油钻探技术. 2021, 49(2): 90–95 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021029>

渤海油田可反洗测调一体分层注水工艺

An Improved Integrated Reverse Washing, Measuring and Adjusting Zonal Water Injection Process in the Bohai Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(3): 97–101 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020016>

鱼骨刺柔性管在碳酸盐岩缝洞型油藏应用的数值模拟研究

Numerical Simulation of Fishbone Flexible Pipes in Fractured Vuggy Carbonate Reservoirs

石油钻探技术. 2017, 45(3): 102–106 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201703018>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2022050

引用格式: 苏建, 窦蓬, 崔国杰, 等. 渤海油田鱼骨刺形多分支孔增产技术现场试验 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 102-107.

SU Jian, DOU Peng, CUI Guojie, et al. Field test of fishbone multi-branch hole stimulation technology in Bohai Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(5): 102-107.

渤海油田鱼骨刺形多分支孔增产技术现场试验

苏 建¹, 窦 蓬^{1,2}, 崔国杰¹, 祝国伟¹, 钟 声³

(1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459; 2. 海洋石油高效开发国家重点实验室, 北京 102249; 3. 中海油能源发展股份有限公司工程技术公司, 天津 300459)

摘 要: 为了提高渤海油田渤中区块裂缝性储层的单井产能, 降低开发成本, 进行了鱼骨刺形多分支孔增产技术试验。鱼骨刺形多分支孔增产技术具有增产工具结构简单、施工便捷、平台负担小的特点, 适合于海上平台作业, 实施后可从主井筒向储层一次性钻成多组长 12 m 的分支孔, 能够穿透近井污染带, 沟通近井地带的油气流动通道, 提高单井产量, 在裂缝性储层增产方面具有巨大的应用潜力。首先, 通过地面试验分析了裂缝性硬地层岩石的可钻性和分支孔眼轨迹的可控性; 在此基础上, 优化了水力参数和施工方案, 并在渤中区块某探井进行了井下试验。该探井实施鱼骨刺形多分支孔增产措施后, 比采气指数提高 29% 以上, 日产气量提高 20% 以上。试验结果表明, 鱼骨刺形多分支孔增产技术可以提高渤海油田渤中区块裂缝性储层的单井产能, 且该技术成本低, 为渤海油田渤中区块效益开发提供了技术支持。

关键词: 鱼骨刺形多分支孔; 增产原理; 裂缝性储层; 单井产能; 渤中区块; 渤海油田

中图分类号: TE357 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2022)05-0102-06

Field Test of Fishbone Multi-Branch Hole Stimulation Technology in Bohai Oilfield

SU Jian¹, DOU Peng^{1,2}, CUI Guojie¹, ZHU Guowei¹, ZHONG Sheng³

(1. CNOOC China Limited, Tianjin Branch, Tianjin, 300459, China; 2. State Key Laboratory Offshore Oil Exploitation, Beijing, 102249, China; 3. CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co, Tianjin, 300459, China)

Abstract: In order to increase the single well production and reduce development costs of fractured reservoirs in the Bozhong Block of Bohai Oilfield, a field test of fishbone multi-branch hole stimulation technology was carried out. The technology is characterized by simple tool structure, convenient construction, and low platform burden which make it suitable for offshore platform operation. As the technology is implemented, multi-branch holes with a length of 12 m can be drilled from the main wellbore to the reservoir at one time, and they can penetrate near-well pollution zones, connect the oil and gas flow channels in near-well zones, and improve the single well production, which has great application potential in increasing the production of fractured reservoirs. To ensure the field test could be carried out smoothly, the first step involved a ground test to analyze the drillability of the rock in fractured reservoirs and the trajectory controllability of multi-branch holes. The hydraulic parameters and construction scheme for the fishbone multi-branch hole stimulation technology were optimized accordingly. Furthermore, the field test was carried out in an exploratory well in the Bozhong block. After the application of fishbone multi-branch hole stimulation technology, the well's gas productivity index and daily gas production were increased by more than 29% and 20%, respectively. The test results showed that the fishbone multi-branch hole technology can improve the single well production of fractured reservoirs in the Bozhong Block of Bohai Oilfield, and provide technical support for the efficient development in the block with low implementation cost.

Key words: fishbone multi-branch hole; stimulation principle; fractured reservoir; single well production; Bozhong Block; Bohai Oilfield

收稿日期: 2021-05-10; 改回日期: 2022-03-31。

作者简介: 苏建(1984—), 男, 河北衡水人, 2007年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业, 高级工程师, 主要从事海洋钻井监督工作。E-mail: sujian2@cnooc.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项“渤海油田高效开发示范工程”(编号: 2016ZX05058-002)资助。

渤海油田渤中区块的潜山气藏具有巨大的勘探开发潜力,是未来渤海油田稳产的重要支撑点^[1]。该区块建井周期长、成本高,少井高产是该区域的主要开发方式。借鉴渤海油田浅层储层的开发经验,该区块潜山气藏在勘探开发阶段开展了压裂、酸化、酸压等增产技术的研究与实践^[2-3],但由于储层埋藏深、地层温度压力高、裂缝发育,难以精准增产,同时随压裂、酸化、酸压施工规模增大,投资会大幅增加。因此,有必要探索新型增产方式,提高单井产能,降低开发成本。

通过技术调研可知^[4-10],鱼骨刺形多分支孔增产技术所用工具结构简单、施工可行性强、无需额外的设备和工具,并且可以精确控制增产层位。鉴于此,中海石油(中国)有限公司天津分公司引进了鱼骨刺形多分支孔增产技术,并在渤中19-6气田进行了试验,试验井比采气指数提高29%以上,单井日产气量提高20%以上。笔者介绍了鱼骨刺形多分支井增产技术的关键工具和基本原理,以渤中区块某探井为例介绍了实施鱼骨刺形多分支孔增产措施的关键环节,并提出了技术改进建议,以期推动该技术在渤海油田的推广应用。

1 渤中区块概况

1.1 储层工程地质特征

渤海油田渤中区块西南环带天然气储量规模巨大,钻井过程中面临多项挑战^[11]:主力目的层位为孔店组和太古界潜山,属高温高压气藏;孔店组非均质性砂砾岩胶结致密,抗压强度高达227.7 MPa,可钻性极差;深部潜山花岗片麻岩地层抗压强度高达276.0 MPa,研磨性强;潜山储层基质渗透率为11.81 mD,裂缝发育段孔隙度可达12.5%~12.8%。对于该区块潜山油气藏,裂缝既是油气储集空间,又是主要的渗滤通道,因此,有效沟通裂缝是提高单井产气量的主要手段。

1.2 常规增产措施的局限性

渤海油田常规的增产措施以酸化、压裂为主^[12-17]。对于渤中区块裂缝性储层,酸化压裂存在以下主要难点:1)目的层温度可达180℃以上,对井下工作液在高温下的缓蚀、缓速、降阻性能提出了挑战;2)工作液用量大,而低孔低渗储层承受外来流体伤害的能力弱;3)储层埋深在4 500 m以深,注入工作液时沿程摩阻大,受管线耐压能力和钻井平台注入泵排量的限制,难以将工作液注入地层造

出人工裂缝,且难以精准预测裂缝走向;4)海上平台空间位置不足,压裂作业需要动用专业船舶,作业易受天气因素影响,作业成本很高。

因此,该区块进行增产作业需满足以下条件:入井工具结构简单、耐高温性强,满足高温环境长时间作业要求;钻井平台现有设备满足作业要求,无需额外动用船舶,工具占用甲板面积小,便于作业;实施后可有效沟通裂缝,提高井筒周围地带的导流能力,从而提高油气井产量。

2 鱼骨刺形多分支孔增产技术

2.1 鱼骨刺形多分支孔增产原理

多分支井一般需要进行“主井眼—分支井眼—主井眼”的多次交替钻进,之后根据油气藏条件和生产要求进行不同等级的分支井完井作业。虽然多分支井的增产效果已被证明^[18-22],但该技术的防砂工艺复杂、管理难度大、修井成本高,海上油田推广应用的条件尚未成熟。

鱼骨刺形多分支孔增产技术是在储层中一次性钻成大量分支孔眼的多分支井,相比于常规多分支井需分多次钻成,鱼骨刺形多分支孔具有作业时间短、分支井眼多的优势。该技术可以喷射出多个微型钻头,并携带合金管钻入储层,通过钻井液驱动涡轮带动钻头旋转,并持续推动钻头向前钻进,在主井筒径向上钻成大量分支孔眼,沟通远离井筒储层内的天然裂缝,显著增大泄油面积,使地层供液能力大大增强,产能得到充分释放。同时,可根据储层情况有选择地配置多个鱼骨刺分支接头,成倍地增加分支孔眼数量,如图1所示。

2.2 鱼骨刺形多分支孔增产工具

鱼骨刺形多分支孔增产工具主要由多组分支接头、裸眼锚定器和触引鞋组成。

多分支接头是鱼骨刺形多分支孔增产工具的核心部件,通过丝扣与套管相连接,壳体上安装有分支井眼导向孔和生产单流阀。分支井眼导向孔上安装有密封件,对钻头的出射角度和方位进行导向。多分支接头配有9组生产单流阀,确保油气通过后进入井筒内。多分支接头内装有3组分支装置,每组分支装置由涡轮、钛合金管和钻头等3部分构成(见图2)。作业期间,钻井液驱动涡轮高速转动,带动连接在涡轮上的钛合金管高速旋转,为钻头提供钻压和破岩扭矩,钻井液通过中空的钛合金管喷射出钻头,一面携带分支孔内的岩屑,同时润滑分支

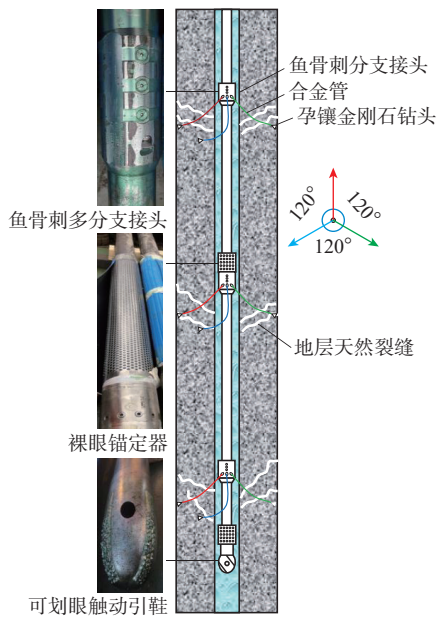


图 1 鱼骨刺形多分支孔的增产原理示意

Fig.1 Stimulation principle of fishbone multi-branch hole

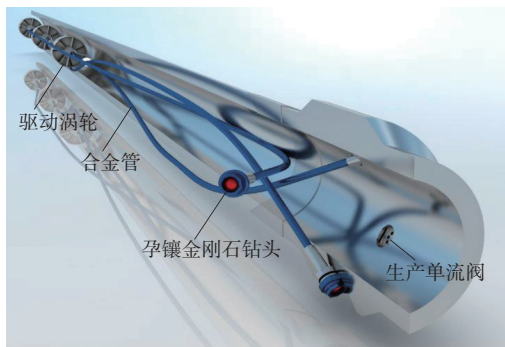


图 2 多分支接头分支装置内部示意

Fig.2 Internal structure of multi-branch joint branching device

管柱、冷却钻头，涡轮随着分支孔钻进在套管内下行直至到达限定位置，完成分支孔钻进。

当鱼骨刺形多分支孔增产工具下至设计位置后，通过井口憋压启动锚定器坐封（触动压差 6 MPa），避免后续作业期间其上下活动。锚定器内径 95.0 mm，初始外径 142.9 mm，加压后其外径最大可膨胀至 158.9 mm，坐封完毕后最大抗拉强度可达 1 500 kN 以上。

触动引鞋连接在鱼骨刺形多分支孔增产工具的最下部，其内部有一破裂盘。为防止鱼骨刺形多分支孔增产工具下入期间遇阻，在触动引鞋上堆焊硬质合金颗粒，与可旋转尾管悬挂器配合以小转速旋转通过遇阻点。当锚定器坐封后，继续加压击破引鞋内的破裂盘（破裂压差约 10 MPa），然后提高排量，进行鱼骨刺形多分支孔的钻进作业。

3 现场试验

3.1 地面试验

鱼骨刺形多分支孔增产技术自 2015 年首次在北京 Smorbukk 油田应用以来，已经在美国、挪威和中东等多个国家和地区的低孔低渗储层中进行了应用，取得了较好的增产效果。但该技术是首次在渤海油田进行应用，因此，首先需要根据地面试验结果，分析裂缝性硬地层岩石的可钻性和分支孔眼轨迹的可控性。

取邻井同层位的 4 块岩心进行岩石可钻性试验，试验采用台式钻机，孕镶金刚石 DT-CG 型钻头，钻压控制在 400 N，转速控制在 1 450 r/min，采用清水对钻头进行冷却，结果见表 1。从表 1 可以看出，用 DT-CG 型钻头钻 4 块岩心的机械钻速为 2.9~8.5 m/h，按照最低机械钻速 2.9 m/h 计算，12 m 长钛合金管完全延伸至地层最多需要 4.1 h。

表 1 岩石可钻性试验结果

Table 1 Rock drillability test results

岩心编号	钻头型号	钻头直径/ mm	钻头长度/ mm	钻压/ N	转速/ (r·min ⁻¹)	平均机械钻速/ (m·h ⁻¹)	钻后孔径/ mm
1	DT-CG	11.6	8.0	400	1 450	8.5	11.9
2	DT-CG	11.6	8.0	400	1 450	6.2	11.9
3	DT-CG	11.6	8.0	400	1 450	5.3	11.9
4	DT-CG	11.6	8.0	400	1 450	2.9	11.9

由于潜山花岗岩地层裂缝发育，分支孔眼钻进期间存在沿裂缝偏斜的风险，因此在含人造裂缝水泥石中进行了分支井功能性试验。分支管外径 8.0 mm，

内径 7.2 mm，出射角度设定为 36°，作业排量 1 200~1 600 L/min 时压耗 7~10 MPa，高速射流起到了明显的辅助破岩效果，12 m 长的分支管进入地层，分

支井眼可以沿设计方位钻进, 钻遇人造裂缝后井眼轨迹未发生偏移。

考虑实际作业中潜山裂缝性地层的压力窗口窄、管串下入期间摩阻扭矩大和开泵循环存在漏失风险, 利用 Landmark 软件对各工况下的扭矩及循环压耗进行了预测, 结果为: 在钻井液排量 500 L/min、转速 5 r/min 下, 管串以 3 m/min 速度下放时的扭矩为 4.56 kN·m; 套管及钻杆内充满钻井液、顶驱不旋转时的下放悬重为 1 948 kN, 上提悬重为 1 965 kN; 在钻井液排量 500 L/min、转速 10 r/min 下, 套管及钻杆内充满钻井液, 管串以 3 m/min 速度下放时的下放悬重为 1 869 kN, 上提悬重为 1 880 kN; 管串下至 $\phi 177.8$ mm 尾管鞋处, 钻井液排量为 500 L/min 时, 地面泵压 10.8 MPa, 引鞋处压降 4.0 MPa, 尾管压降 5.2 MPa; 管串下至井底, 钻井液排量为 500 L/min 时, 地面泵压 11.4 MPa, 引鞋处压降 4.0 MPa, 尾管压降 5.5 MPa。模拟管串为引鞋+ $\phi 114.3$ mm 尾管+鱼骨刺形增产工具+锚定器+ $\phi 88.9$ mm 钻杆+ $\phi 139.7$ mm 钻杆, 裸眼及套管段的摩阻系数根据实际钻进参数反算, 分别为 0.25 和 0.30, 钻井液密度为 1.17 kg/L。

校核结果表明, 管串下入和循环期间钻井设备的能力满足可能出现的最大极限, 同时破裂盘、尾管悬挂器等不存在提前启动的风险。此外, 为保证增产效果, 根据完钻后测井解释成果确定产层、设计管柱, 产层间的非生产层使用 $\phi 114.3$ mm 尾管进行封隔, 确保分支孔眼正对产层。

3.2 井下试验

鱼骨刺形多分支孔增产技术在渤海油田渤中区域某井进行了试验, 该井四开 $\phi 215.9$ mm 井眼钻进太古界潜山顶部风化壳层位, 下入 $\phi 177.8$ mm 尾管, 五开采用 $\phi 152.4$ mm 钻头钻至井深 5 529.00 m 完钻, 裸眼段长 453.00 m。为确认原始地层产能, 五开完钻后进行常规的测井和测试作业^[23], 随后在裸眼内随后下入 22 组多分支接头进行多分支孔钻进后再次进行测试, 通过对比 2 次的测试结果, 分析鱼骨刺形多分支孔增产技术的增产效果。该井钻鱼骨刺形多分支孔后的井身结构如图 3 所示。

第一次测试结束后, 采用大尺寸稳定器进行通井, 使井眼通畅, 以确保鱼骨刺形增产工具顺利下入。在井口连接鱼骨刺形增产工具、尾管、锚定器及 $\phi 114.3$ mm 尾管悬挂器总成, 下至需要进行增产作业的裸眼层位。

鱼骨刺形多分支孔增产作业施工过程分为以下 5 个阶段:

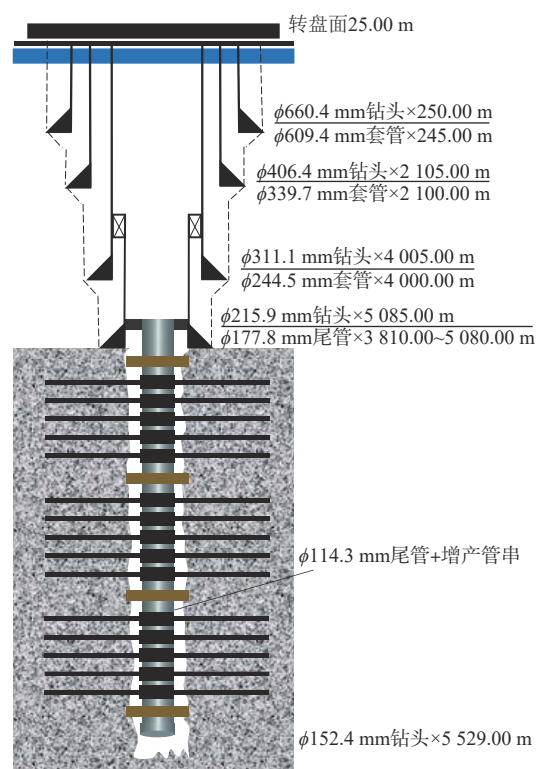


图3 鱼骨刺形多分支孔实施后的井身结构

Fig.3 Casing program after fishbone multi-branch hole technology implemented

1) 坐封锚定器, 打破破裂盘。接通顶驱后开泵, 将排量升至 200 L/min 进行循环, 待返出正常后将排量提至 650 L/min, 泵压升至 6.00 MPa 后, 将排量提至 800 L/min, 泵压最高升至 9.15 MPa, 泵压较低, 与计算出的泵压有一定差距, 判断破裂盘提前破裂。

2) 尾管悬挂器坐挂、脱手、剪切球座。井口投球, 以 300 L/min 排量送球入座。憋压至 11.70 MPa, 稳压 5 min, 下放钻具并下压 300 kN, 确认悬挂器坐挂。憋压至 18.80 MPa, 稳压 5 min, 上提钻具确认送入工具脱手成功; 下放钻具并下压 30 kN, 憋压至 20.85 MPa, 憋通球座并建立循环。

3) 钻穿保护套。快速开泵将排量提至 1 100 L/min, 泵压快速升至 23.00 MPa, 此时管柱内压差可以辅助坐封锚定器。驱动涡轮启动, 在压差作用下开始钻保护套; 排量维持 1 100 L/min, 泵压由 23.00 MPa 降至 18.00 MPa, 确认保护套已经钻穿; 鱼骨刺接头开始分流, 钻头开始钻进地层。

4) 鱼骨刺形分支孔钻进阶段。初期推荐排量 1 100~1 200 L/min, 使钻头稳定钻入地层; 当排量提至 1 200 L/min 以上时, 全部鱼骨刺分支孔均已经开始钻进。

5) 鱼骨刺形分支孔快速钻进阶段。将排量提至 1 400 L/min, 快速钻进分支孔, 随着分支孔增多, 泵

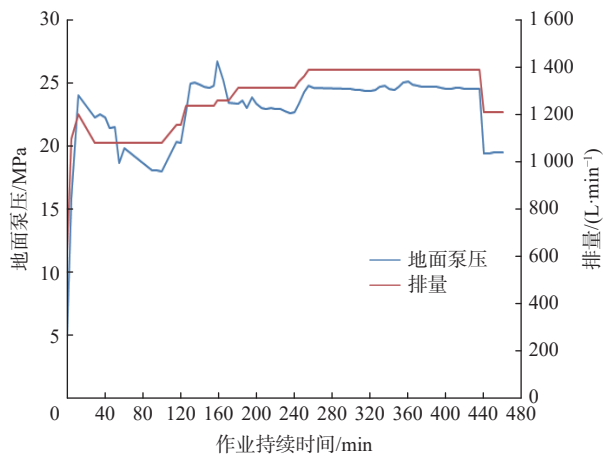


图4 鱼骨刺形多分支孔钻进施工曲线

Fig.4 Drilling construction curve of fishbone multi-branch hole

表2 钻鱼骨刺多分支孔前后试验井的测试结果

Table 2 Test results of a well before and after fishbone multi-branch hole technology implemented

测试时间	测试井段/m	厚度/m	求产方式	井底压差/MPa	压力系数	比采气指数/($\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	日产气量/ m^3
钻分支孔前	5 076~5 529	453	敞放	46.43	1.10	0.68	14 235
钻分支孔后	5 076~5 529	453	敞放	44.60~48.80	1.10	0.80~0.88	16 289~17 732

分支孔, 适合海上油田潜山地层增产作业, 有助于释放单井产能。

2) 对分支孔走向与岩石裂缝的空间位置关系的研究不够深入, 建议对两者的关系进行深入研究, 以提高分支孔钻进方向的可控性和可跟踪性。

3) 目前通过泵压变化判断分支孔的延伸程度, 但其受作业条件干扰大, 建议开展量化精准评价方法研究。

4) 钛合金管与分支孔的环空小, 生产期间环空气液流动复杂, 建议进一步研究油、气在各分支孔眼中的流动特性, 为优化工具结构和生产制度提供依据。

参考文献

References

- [1] 薛永安. 渤海海域深层天然气勘探的突破与启示 [J]. 天然气工业, 2019, 39(1): 11–20.
XUE Yong'an. The breakthrough of the deep-buried gas exploration in the Bohai Sea area and its enlightenment [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(1): 11–20.
- [2] 李根生, 夏强, 黄中伟, 等. 深井水力喷射压裂可行性分析及设计计算 [J]. 石油钻探技术, 2011, 39(5): 58–62.

压呈缓慢降低趋势。钻进期间泵压出现 2 个小峰值 (见图 4), 显示鱼骨刺形分支孔分 2 批延伸到位。待排量和泵压趋于稳定、循环测后效气量, 确认井控安全后起钻, 进行测试作业。

3.3 增产效果评价

试验井钻鱼骨刺形多分支孔前后的测试结果如表 2 所示。从表 2 可以看出, 试验井实施鱼骨刺形多分支孔增产措施后, 比采气指数提高 29% 以上, 日产气量提高 20% 以上。这表明, 实施鱼骨刺形多分支孔增产措施可以提高地层的供气能力和单井的产气量。

4 结论与建议

1) 鱼骨刺形多分支孔增产技术具有设备结构简单、施工便捷、用量少的特点, 可一次性钻成大量

LI Gensheng, XIA Qiang, HUANG Zhongwei, et al. Feasibility study and treatment design of hydrojet-fracturing in deep wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(5): 58–62.

- [3] 刘平礼, 黄晶, 幸雪松, 等. 超高温裂缝性变质片麻岩凝析油气藏缝网酸压改造技术: 以海上 A 气田太古界潜山储层为例 [J]. 天然气工业, 2021, 41(12): 73–80.
LIU Pingli, HUANG Jing, XING Xuesong, et al. Fracture-network acid fracturing technology for ultra-high temperature fractured metamorphic gneiss condensate reservoirs: a case study of the Archean buried-hill reservoirs of the offshore A Gas Field [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(12): 73–80.
- [4] FREYER R, KRISTIANSEN T, MADLAND M V, et al. Multilateral system allowing 100 level 5 laterals drilled simultaneously [R]. SPE 121814, 2009.
- [5] RICE K, JORGENSEN T, WATERS J W. First installation of efficient and accurate multilaterals stimulation technology in carbonate oil application [R]. SPE 171021, 2014.
- [6] RICE K, JØRGENSEN T, SOLHAUG K. Technology qualification and installation plan of efficient and accurate multilaterals drilling stimulation technology for sandstone oil application [R]. SPE 174035, 2015.
- [7] FREYER R. Method and a device for solvent injection in a subsurface well: US08037937B2 [P]. 2011-10-18.
- [8] FREYER R. Method and device for making lateral openings out of a wellbore: US20110017445 [P]. 2011-01-27.
- [9] FREYER R. Method and jetting head for making a long and narrow

- penetration in the ground: US20120273276A1[P]. 2012-11-01.
- [10] 程光明, 何同, 曹海涛. 柔性分支管增产工具关键技术研究[J]. 石油机械, 2020, 48(2): 85-89.
CHENG Guangming, HE Tong, CAO Haitao. Research on key techniques of reservoir stimulation using fishbone flexible pipes[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(2): 85-89.
- [11] 邓建明, 马英文. 渤海中深层天然气田钻完井关键技术现状及展望[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(6): 677-683.
DENG Jianming, MA Yingwen. Status and prospect of key drilling and completion technologies used in middle-deep natural gas fields of the Bohai Sea[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(6): 677-683.
- [12] 王达, 卢岩, 周福建, 等. 低、无污染基质孔隙型灰岩储层基质酸化增产可行性探索[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(14): 5603-5609.
WANG Da, LU Yan, ZHOU Fujian, et al. Feasibility study of matrix acidizing technology to stimulate low damaged or undamaged porous carbonate reservoirs[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(14): 5603-5609.
- [13] 张明, 刘光泽, 程飞, 等. SZ36-1 油田稠油储层解堵酸化技术研究[J]. 非常规油气, 2017, 4(2): 85-90.
ZHANG Ming, LIU Guangze, CHENG Fei, et al. The heavy oil reservoir of SZ36-1 Oilfield acidification technology research and application[J]. Unconventional Oil & Gas, 2017, 4(2): 85-90.
- [14] 杨子, 冯卫华, 施洋, 等. 多氢酸酸化技术在海上油田中的应用与研究[J]. 石油化工应用, 2014, 33(2): 59-62.
YANG Zi, FENG Weihua, SHI Yang, et al. The application and research of reservoir acidification reconstruction technology in offshore field[J]. Petrochemical Industry Application, 2014, 33(2): 59-62.
- [15] 穆笛. 储层改造中人工裂缝穿过天然裂缝的判别机理[J]. 石油机械, 2018, 46(7): 80-83.
MU Di. Identification mechanism of artificial fracture crossing natural fracture in reservoir stimulation[J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(7): 80-83.
- [16] 张宏友. 渤海油田某奥陶系潜山碳酸盐岩油藏酸化后试井曲线特征分析[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2019, 21(2): 49-51.
ZHANG Hongyou. Analysis of well test curve characteristics of ordovician buried carbonate reservoir after acidizing in Bohai Oilfield[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Sciences Edition), 2019, 21(2): 49-51.
- [17] 孙林, 李旭光, 黄利平, 等. 渤海油田注水井延效酸化技术研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(2): 90-95.
SUN Lin, LI Xuguang, HUANG Liping, et al. Research and application of prolonged-effect acidizing technology for water injection wells in the Bohai Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(2): 90-95.
- [18] 孙恩慧, 杨东东, 杨威, 等. 鱼骨型多分支井产能预测公式推导及影响因素分析[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2020, 22(3): 32-35.
SUN Enhui, YANG Dongdong, YANG Wei, et al. Productivity prediction and its influencing factors for herring bone-like laterals well[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Sciences Edition), 2020, 22(3): 32-35.
- [19] 李晓益, 艾爽, 程光明, 等. 鱼骨刺柔性管在碳酸盐岩缝洞型油藏应用的数值模拟研究[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(3): 102-106.
LI Xiaoyi, AI Shuang, CHENG Guangming, et al. Numerical simulation of fishbone flexible pipes in fractured vuggy carbonate reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(3): 102-106.
- [20] 王敏生, 光新军, 赵阳, 等. 6 级分支井系统及国内研究进展[J]. 石油机械, 2015, 43(3): 21-25.
WANG Minsheng, GUANG Xinjun, ZHAO Yang, et al. Six-lateral well system and progress of researches in China[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(3): 21-25.
- [21] 白殿刚, 陈秋睿, 安鹏, 等. 张海 39-39Z 分支井钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(4): 494-497.
BAI Diangang, CHEN Qiurui, AN Peng, et al. Drilling fluid technology of Zhanghai 39-39Z multilateral well[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2020, 37(4): 494-497.
- [22] 豆志远, 王昆剑, 李进, 等. 渤海油田水平分支井钻完井关键技术[J]. 特种油气藏, 2020, 27(2): 157-163.
DOU Zhiyuan, WANG Kunjian, LI Jin, et al. Key technologies for horizontal branch well drilling and completion in Bohai Oilfield[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(2): 157-163.
- [23] 谭忠健, 项华, 刘富奎, 等. 渤海复杂油气藏测试技术研究及应用效果[J]. 中国海上油气, 2006, 18(4): 223-228.
TAN Zhongjian, XIANG Hua, LIU Fukui, et al. Testing techniques for complex reservoirs and their application in Bohai Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2006, 18(4): 223-228.

[编辑 刘文臣]