



桥式同心井下恒流分层注水技术

杨玲智 周志平 杨海恩 姬振宁

Downhole Constant-Flow Stratified Water Injection Technology with Concentric Bridge

YANG Lingzhi, ZHOU Zhiping, YANG Haien, JI Zhenning

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2022051>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长庆油田同心验封测调一体化分层注水技术

Stratified Water Injection Technology of Concentric Seal-Check, Logging and Adjustment Integration in Changqing Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(2): 113-117 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020023>

长庆油田低渗透油藏聚合物微球深部调驱工艺参数优化

Optimization of Operational Parameters for Deep Displacement Involving Polymer Microspheres in Low Permeability Reservoirs of the Changqing Oilfield

石油钻探技术. 2018, 46(1): 75-82 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018030>

胜利油田长效扩张式分层注水技术

Long-Term Expandable Zonal Water Injection Technology in the Shengli Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(4): 100-105 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020092>

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>

胜利海上油田安全可控长效分层注水技术

Safe and Controllable Long-Term Layered Water Injection Technology for the Shengli Offshore Oilfield

石油钻探技术. 2019, 47(1): 83-89 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018149>

低渗透油藏侧钻水平井小井眼分段多簇压裂技术

Segmented Multi-Cluster Fracturing Technology for Sidetrack Horizontal Well with Slim Holes in Low Permeability Reservoir

石油钻探技术. 2020, 48(6): 94-98 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020112>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2022051

引用格式: 杨玲智, 周志平, 杨海恩, 等. 桥式同心井下恒流分层注水技术 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 104-108.

YANG Lingzhi, ZHOU Zhiping, YANG Haien, et al. Downhole constant-flow stratified water injection technology with concentric bridge [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 104-108.

桥式同心井下恒流分层注水技术

杨玲智^{1,2}, 周志平^{1,2}, 杨海恩^{1,2}, 姬振宁^{1,2}

(1. 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院, 陕西西安 710018; 2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西西安 710018)

摘 要: 低渗透油藏分层注水合格率受压力波动等因素影响下降快, 针对这一问题, 设计了井下小体积水嘴自调节机构, 将其集成于桥式同心井下恒流分层配水器, 以缓解压力波动导致的分层注水量不稳定问题。基于伯努利方程, 在理论分析及室内试验的基础上, 设计了水嘴自调节机构, 以达到井下小流量分层恒流注水目的。室内试验可知, 自调节机构可在注入压力 0.2~1.5 MPa 范围内实现调节。采用水嘴自调节机构形成的桥式同心井下恒流分层注水技术, 已在长庆油田低渗透油藏应用 40 余井次, 实现了注入压力上升 1.5 MPa 以内不需人工干预、自动调节分层注水量至配注合格。长庆油田现场应用表明, 桥式同心井下恒流分层注水技术可将 6 个月后分层注水合格率由常规分层注水的 43.4% 提高至 75.0%, 可将测调频次由常规分层注水的 4 次/年优化为 2 次/年, 并延长分层注井测调周期, 单井作业费用降低 2.6 万元/年。桥式同心井下恒流分层注水技术, 为低渗透油藏精细注水开发提供了更高效的分层注水手段。

关键词: 分层注水; 桥式同心; 井下恒流; 自动调节; 低渗透油藏; 长庆油田

中图分类号: TE357.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2022)04-0104-05

Downhole Constant-Flow Stratified Water Injection Technology with Concentric Bridge

YANG Lingzhi^{1,2}, ZHOU Zhiping^{1,2}, YANG Haien^{1,2}, JI Zhenning^{1,2}

(1. Oil & Gas Technology Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi, 710018, China;
2. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi, 710018, China)

Abstract: In view of the problem that downhole pressure fluctuations cause the qualified rate of stratified water injection to drop rapidly in low permeability reservoirs, a downhole small-volume water nozzle was designed with a self-adjusting mechanism. It was then integrated into the downhole constant-flow stratified water distributor using a concentric bridge, which would minimize pressure fluctuation-triggered stratified flow variations. On the basis of the Bernoulli principle, with theoretical analysis and laboratory experiment, a self-adjusting mechanism was designed to achieve the stratified and constant flow water injection with small flow rate. According to laboratory experiments, the self-adjusting mechanism can be adjusted within an injection pressure range of 0.2–1.5 MPa. Adopting the water nozzle mechanism, the downhole constant-flow stratified water injection technology with concentric bridge has been applied in more than 40 wells in the low permeability reservoirs of Changqing Oilfield. It is possible to achieve an increase of injection pressure rise by 1.5 MPa without manual intervention, and the stratified flow adjusted automatically until the injection is qualified. The field application in Changqing Oilfield showed that the technology could increase the qualified rate of stratified water injection from 43.4% to 75.0% within 6 months and reduce the testing and adjusting frequency from 4 times to 2 times per year. It can also prolong the testing and adjusting period of the involved wells so that the annual operation expenses for a single well can be reduced by 26 000 yuan. The stratified water injection

收稿日期: 2021-05-26; 改回日期: 2022-04-24。

作者简介: 杨玲智 (1986—), 男, 吉林白山人, 2009 年毕业于中国石油大学 (北京) 石油工程专业, 2012 年获西南石油大学油气田开发工程专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事油田注水工具研发设计及低渗透油田水驱相关技术研究。E-mail: ylz_h_cq@petrochina.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项“低渗-超低渗油藏提高储量动用关键技术” (编号: 2017ZX05013-005)、中国石油与天然气股份公司重大科技专项“长庆油田 5000 万吨持续高效稳产关键技术研究与应用”之课题 10“低渗油藏控水稳油工艺技术研究及试验” (编号: 2016E-0510) 联合资助。

technology proposed has provided an efficient stratified water injection method for fine water injection development in low permeability reservoirs.

Key words: stratified water injection; concentric bridge; downhole constant flow; automatic adjustment; low permeability reservoir; Changqing Oilfield

精细分层注水可有效缓解油藏层间、层内非均质性导致的纵向水驱不均难题, 大幅提高油藏水驱采收率, 是国内外最经济、最有效的水驱稳产手段。截至目前, 国内已发展形成了固定式分注、偏心分注和桥式分注等分层注水技术, 满足了直井、定向井精细分层注水的要求, 已规模化应用 6 万余口井^[1-7]。但应用分层注水技术时, 测调周期内水嘴的开度是固定的, 当注水压力波动时, 分层注水量变化幅度大, 尤其在低渗透油藏小注水量分注时尤为突出^[8-10]。长庆油田低渗透油藏目前就存在分层注水合格率受压力波动等因素影响而下降快的问题。对于该问题, 缩短测调周期可在一定程度上改善, 但测调费用会大幅升高, 严重影响了分层注水的经济性^[9]。为了解决长庆油田低渗透油藏分层注水合格率受压力波动等因素影响大的问题, 笔者分析了井下恒流控制原理, 设计了井下小体积水嘴自调节机构, 将其集成于桥式同心井下恒流分层配水器, 以缓解压力波动导致的分层注水量不稳定的问题, 并基于此形成了桥式同心井下恒流分层注水技术。该技术在长庆油田应用 40 余井次, 提高了分层注水合格率, 延长了测调周期, 降低了测调费用, 取得了很好的综合应用效果。

1 井下恒流控制原理

依据伯努利方程^[11], 对水嘴的水力学特性进行了分析。水嘴流量可表示为:

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

式中: Q 为水嘴流量, m^3/d ; C_d 为流量系数; A 为水嘴开度面积, m^2 ; Δp 为水嘴前后压差, MPa ; ρ 为注入水密度, kg/m^3 。

由式(1)可知, 注水过程中, 注入水密度 ρ 、流量系数 C_d 为定值, 水嘴调节周期内水嘴开度面积 A 也为定值, 要使水嘴流量 Q 相对恒定, 需控制水嘴前后压差 Δp 的变化幅度。

基于式(1), 设计了控制井下恒流的自调节机构(见图 1): p_1 为进液口前(减压前)的压力, p_2 为经自调节机构过流通道后(减压后)的压力, 通过侧

向导压通道将压力 p_2 导向自调节机构的大圆柱下端和小圆柱上端, 经过人工调节水嘴流出, 出液口外(节流后)的压力为 p_3 , 与自调节机构大圆柱上端的弹簧腔相通(F_s 为弹簧弹力, N)。其控制原理: 自调节机构中平衡弹簧产生附加压力 $\Delta p'$ ($\Delta p' = p_2 - p_3$), 使水嘴前后实际压差变为 $\Delta p + \Delta p'$, 抵消注水压力增量, 来控制水嘴流量 Q 使之保持平稳, 即通过自动调节 $\Delta p'$ 来确保流量恒定不变。

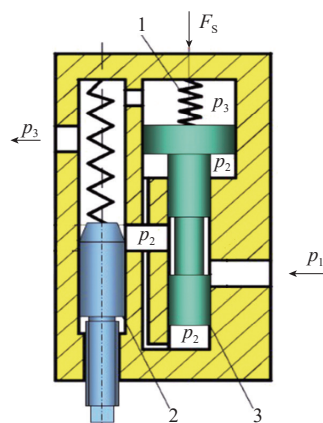


图 1 恒流控制原理示意

Fig.1 Principle of constant flow control

1.平衡弹簧; 2.人工调节水嘴; 3.自调节机构

2 关键结构设计

桥式同心井下恒流分层注水工具主要由验封测调一体化仪器、桥式同心井下恒流配水器组成。其中, 验封测调一体化仪器是成熟工具。因此, 桥式同心井下恒流配水器是该技术的核心部分, 需要实现恒流组件的小型化设计及小流量恒流控制。

2.1 井下恒流配水器的结构

考虑配水器本体空间限制、自调节机构调节启动压差等因素, 井下恒流配水器采用同心齿轮啮合调节机构。即通过调节大齿轮带动传动齿轮副旋转, 传动齿轮副带动调节水嘴阀芯运动, 来调节配水器水嘴开度。配水器本体内设计自调节机构, 置于中心通道与节流组件之间, 建立分层水流通道。

井下恒流配水器主要由上接头、定位筒、外护筒、本体、节流组件、调节套、下接头、出水口、水嘴阀芯、传动齿轮副、平衡弹簧及自调节机构组成, 本

体上设计了出水口、自调节机构,节流组件包括水嘴阀芯、传动齿轮副,如图2所示。

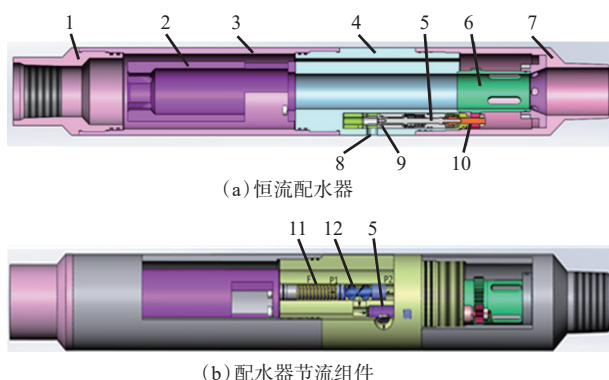


图2 恒流配水器和节流组件的结构

Fig.2 Structures of constant-flow water distributor and throttling assembly

- 1.上接头; 2.定位筒; 3.外护筒; 4.本体; 5.节流组件; 6.调节套;
7.下接头; 8.出水口; 9.水嘴阀芯; 10.传动齿轮副; 11.平衡弹簧;
12.自调节机构

2.2 井下小体积水嘴自调节机构设计

自调节机构需满足小型化及恒流调节控制要求。为此,进行了如下设计:配水器外径 0.114 m,最大内通径 0.046 m,按照配水器承压 60 MPa、抗拉强度 550 kN,配水器本体上自调节机构的环空间隙 0.018 m,考虑密封胶圈安装,将自调节机构的最大外径设置为 0.017 m,机构上端、下端用胶圈密封;因为平衡弹簧为恒流控制关键,用 Δp ($\Delta p = p_1 - p_2$) 在自调节机构端部产生的作用力平衡弹簧压缩;过流面设计为矩形,长度 0.004~0.009 m,承压移动距离 0.006 m,用其平衡弹簧的压缩行程;考虑平衡弹簧的工作环境、压力波动的敏感性、承载压力循环载荷频率等因素,压力波动值设计为 0.2~1.5 MPa;弹簧的初始参数:工作行程 0.006 m,外径 0.015 m,最小载荷 39.2 N,最大载荷 196.5 N。

假定弹簧预紧安装形变量为 0.005 m,最小载荷为 39.2 N,压紧形变量为 0.011 m,最大载荷为 196.5 N,弹簧材料的抗拉强度为 1750 MPa,依据力学疲劳公式,求得极限剪切应力为 875.0 MPa。同时,求得线径 0.002 m 弹簧的极限载荷为 213.0 N;以弹簧作用 10 000 次循环应变的疲劳验算,疲劳强度安全系数为 1.245,达到设计要求。

3 室内性能试验

3.1 基础性能试验

由文献[4]可知,桥式同心井下恒流配水器应在 25.0 MPa 压差下,水嘴密封可靠,满足封隔器坐

封要求。同时,常压测调扭矩应小于 5.0 N·m,带压测调扭矩应小于 18.0 N·m。

3.1.1 配水器密封性试验

将桥式同心井下恒流配水器的水嘴关闭后,安装于密封性测试装置,在内外压差 25.0 MPa 条件下稳压 5.0 min,无压降,密封合格。

3.1.2 调节扭矩试验

在常压条件下,模拟调节仪带动水嘴旋转开关,试验得到测调扭矩为 3.0~4.0 N·m,符合测调扭矩小于 5.0 N·m 的要求。

在内压 20.0 MPa、环空压力 18.0 MPa 条件下,模拟正常注水时打开水嘴的情况,试验得到扭矩为 10.0~14.0 N·m,满足测调扭矩小于 18.0 N·m 的要求。

3.2 恒流性能试验

为了解桥式同心恒流配水器的恒流性能,设计了恒流试验装置(如图3所示),进行了恒流性能试验。试验分3组进行:1)单配水器恒流恒流性能试验;2)恒流配水器与常规配水器恒流性能对比试验;3)2支恒流配水器相互影响试验。

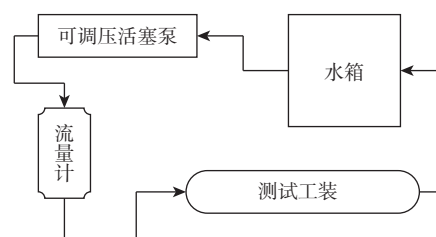


图3 恒流配水器试验装置示意

Fig.3 Testing apparatus for constant-flow water distributor

3.2.1 单配水器恒流性能试验

将1支桥式同心恒流配水器连接于试验装置,设置初始注入压力 1.5 MPa,压力上升幅度 0.3 MPa,最大注入压力 3.6 MPa,出口压力为大气压,试验结果如图4所示。

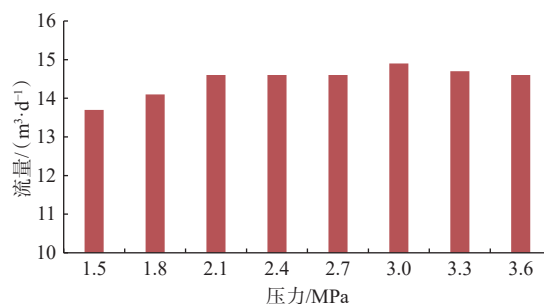


图4 单支恒流配水器恒流性能试验结果

Fig.4 Constant-flow performance test of a single constant-flow water distributor

由图 4 可知, 压力上升最大幅度 2.1 MPa, 流量变化 7.0%, 满足分层注水要求。

3.2.2 恒流配水器与常规配水器恒流性能对比试验

将 1 支桥式同心恒流配水器与 1 支常规配水器串联连接于试验装置, 设置初始注入压力 1.0 MPa, 初始流量 10.7 m³/d, 测试注入压力分别为 1.1, 1.9 和 3.6 MPa 时 2 支配水器的流量, 结果如图 5 所示。

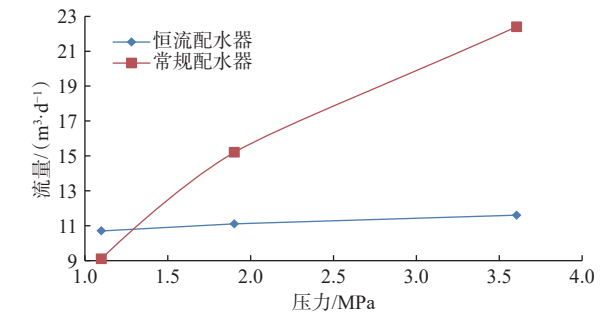


图 5 恒流配水器与常规配水器恒流性能对比试验结果
Fig.5 Comparison of test results of constant-flow performance between constant-flow water distributor and conventional water distributor

由图 5 可知: 相同压力变化条件下, 恒流配水器流量变化小, 波动幅度均小于 1.07 m³/d; 而常规配水器压力波动 0.8 MPa 时, 流量波动达 7.28 m³/d。

3.2.3 2 支恒流配水器相互影响试验

将 2 支桥式同心恒流配水器串联连接于试验装置, 初始注入压力 1.5 MPa, 初始流量 10.7 m³/d, 测试注入压力分别为 1.6, 2.2 和 3.2 MPa 时 2 支配水器的流量, 结果如图 6 所示。

由图 6 可知: 配水器间流量差小于 0.107 m³/d, 恒流配水器间的相互影响较小; 压力波动 1.7 MPa

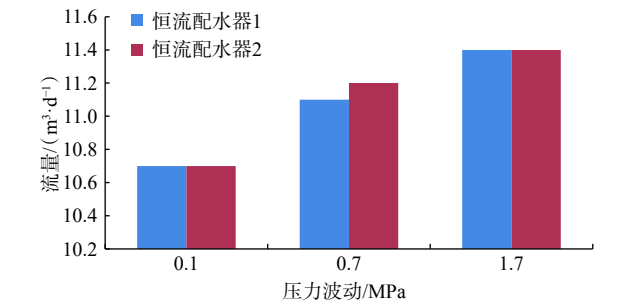


图 6 不同压力波动下恒流配水器间影响试验结果
Fig.6 Influence test of constant-flow water distributor under different pressure fluctuations

时, 流量波动 0.715 m³/d, 误差仅 6.6%。
上述试验结果表明, 桥式同心恒流配水器能够有效缓解压力波动导致的流量变化, 从而延长分层注水有效期。

4 现场应用

以上述水嘴自调节机构为核心的桥式同心井下恒流分层注水技术, 在长庆油田的南梁、环江、华庆等区块已应用 40 余井次, 配套测试 100 余井次, 单层配注量 5.0~10.0 m³/d, 系统压力在 0.5~1.5 MPa 波动, 6 个月后分注合格率 75.0%, 预计单井年可减少人工测调 2 井次, 节约测试成本 2.6 万元。应用结果表明, 该技术可以解决压力波动导致的分层注水合格率下降问题, 进一步提高分层注水的适应性、减少现场作业频次, 实现分层注水提质增效。

以 3 口井(H553-57 井、H480-52 井和 H480-50 井)为例, 分析具体应用情况, 并与一口未应用该技术的邻井(H553-59 井)进行了对比, 结果见表 1。

表 1 桥式同心恒流分层注水技术 3 口应用井与邻井的对比
Table 1 Comparison of three wells used constant-flow stratified water injection technology with concentric bridge and adjacent wells

井别	井号	井深/m	井斜角/(°)	层数	配注量/ (m ³ ·d ⁻¹)	调后实注量/ (m ³ ·d ⁻¹)	3 个月实注量/ (m ³ ·d ⁻¹)	6 个月实注量/ (m ³ ·d ⁻¹)
应用井	H553-57	2 534	22.6	2	10.0	9.8	9.7	10.2
					10.0	10.6	11.8	11.5
	H480-52	2 095	24.1	2	5.0	4.9	5.2	4.9
					5.0	5.1	4.6	4.2
	H480-50	2 145	32.8	2	5.0	5.1	5.2	5.1
					5.0	5.2	5.4	4.9
邻井	H553-59	2 435	19.8	2	8.0	7.9	6.3	4.4
					7.0	7.0	8.8	9.5

从表1可以看出:3口应用井均验封合格,测调后分层流量满足长庆油田测调误差不高于10%的要求,6个月后实注量与配注量误差在2%~15%,满足长庆油田配注误差不高于20%的要求;邻井H553-59井虽然调后分层流量满足长庆油田测调误差不高于10%的要求,但3个月后上、下层实注量与配注量误差分别为21.3%和25.7%,已不满足长庆油田配注误差不高于20%的要求。

连续测试了应用井H553-57井9个月的实注量,结果如图7所示。

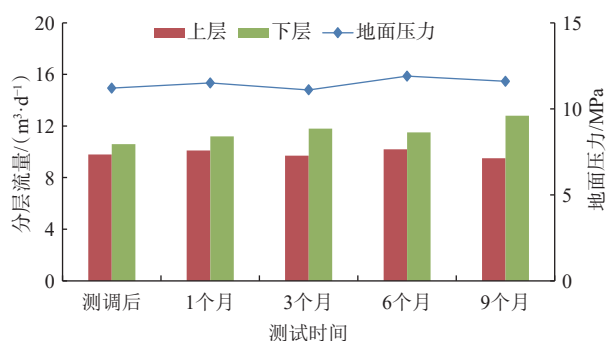


图7 H553-57井9个月分层测试数据

Fig.7 9-month Stratified testing data in Well H553-57

从图7可以看出, H553-57井上下两层6个月的实注量与配注量误差在2%~15%,满足配注误差不高于20%的要求,说明采用桥式同心井下恒流分层注水技术可将测调周期由3个月延长至6个月,测调频次可由4次/年减少至2次/年。

5 结论与建议

1)设计了恒流自调节机构,集成在桥式同心配水器内,注水压力自动调节范围0.2~1.5 MPa,实现了井下分层注水量恒流调节。

2)以井下小体积水嘴自调节机构为核心的桥式同心井下恒流分层注水技术,在低渗透油藏分层注水效果良好,6个月后分层注水合格率可保持75.0%,可有效延长测调周期,实现分层注水提质增效。

3)桥式同心井下恒流分层注水技术通过机械方式实现恒流调控,受注水工具空间限制,水嘴无法全行程自动开关,存在一定卡堵风险。建议进一步研究井下电动控制方式,提高自动化控制水平。

参考文献

References

[1] 刘合,裴晓含,罗凯,等.中国油气田开发分层注水工艺技术现状与发展趋势[J].石油勘探与开发,2013,40(6):733-737.

LIU He, PEI Xiaohan, LUO Kai, et al. Current status and trend of separated layer water flooding in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(6): 733-737.

[2] 于九政,巨亚峰,郭方元.桥式同心分层注水工艺的研究与试验[J].石油钻采工艺,2015,37(5):92-94.

YU Jiuzheng, JU Yafeng, GUO Fangyuan. Research and experiment on bridge concentric separated layer water injection technology[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2015, 37(5): 92-94.

[3] 杨玲智,刘延青,胡改星,等.长庆油田同心验封测调一体化分层注水技术[J].石油钻探技术,2020,48(2):113-117.

YANG Lingzhi, LIU Yanqing, HU Gaixing, et al. Stratified water injection technology of concentric seal-check, logging and adjustment integration in Changqing Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(2): 113-117.

[4] 叶勤友,刘亚珍,孙伟,等.智能化多管分层注水技术研究与应用[J].石油机械,2021,49(6):82-87.

YE Qinyou, LIU Yazhen, SUN Wei, et al. Research of intelligent multi-pipe separate zone injection technology[J]. *China Petroleum Machinery*, 2021, 49(6): 82-87.

[5] 刘红兰.胜利海上油田安全可控长效分层注水技术[J].石油钻探技术,2019,47(1):83-89.

LIU Honglan. Safe and controllable long-term layered water injection technology for the Shengli offshore oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(1): 83-89.

[6] 贾贻勇,李永康.胜坨油田套损井分层注水及测调技术[J].石油钻探技术,2021,49(2):107-112.

JIA Yiyong, LI Yongkang. Techniques of layering injection and the measurement-adjustment towards wells with casing damage in Shengtuo Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(2): 107-112.

[7] 徐兴安,张凤辉,杨万有,等.注水井高效测调一体化技术研究与应用[J].石油机械,2020,48(8):43-49.

XU Xing'an, ZHANG Fenghui, YANG Wanyou, et al. Integrated high efficient testing and adjustment technology for water injection wells[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(8): 43-49.

[8] 刘红兰.分层注水井测调一体化新技术[J].石油钻探技术,2018,46(1):83-89.

LIU Honglan. A new integrated measuring and adjusting technology of separate layer water injection well[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(1): 83-89.

[9] 刘义刚,孟祥海,张志熊,等.海上油田小井眼分注井测调一体化工艺研究[J].石油机械,2021,49(3):90-94.

LIU Yigang, MENG Xianghai, ZHANG Zhixiong, et al. Study on the integrated measurement and adjustment technology for slim hole separate injection wells in offshore oilfield[J]. *China Petroleum Machinery*, 2021, 49(3): 90-94.

[10] 杨玲智,于九政,王子建,等.桥式同心分层压降测试仪器研制与试验[J].石油机械,2017,45(6):96-98.

YANG Lingzhi, YU Jiuzheng, WANG Zijian, et al. Development and test of bridge concentric separate layer pressure testing device[J]. *China Petroleum Machinery*, 2017, 45(6): 96-98.

[11] 丁晓芳.井下空心恒流量配水技术研究[J].石油机械,2009,37(11):68-71.

DING Xiaofang. Research on the borehole hollow constant flow water distribution technology[J]. *China Petroleum Machinery*, 2009, 37(11): 68-71.