

引用格式:张乐,刘长龙,寇磊,等.海上油田大斜度井缆控智能分层注聚技术研究及应用[J].油气藏评价与开发,2024,14(1):133-137.
ZHANG Le, LIU Changlong, KOU Lei, et al. Research and application of intelligent polymer injection technology with cable control for high angle wells in offshore oilfield[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(1): 133-137.
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024.01.018

海上油田大斜度井缆控智能分层注聚技术研究及应用

张乐¹,刘长龙¹,寇磊²,陈征¹,张璐¹,徐元德¹,王胜²,薛德栋²

(1.中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300452;2.中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司,天津 300452)

摘要:海上油田单管分层测调注聚工艺不能满足井斜大于60°的井况,同时测调时需要钢丝作业配合,平均单井测调用时6 h,测调效率低,无法真正意义上实现井下温度、压力、流量的实时监测与注入量调整。在介绍海上油田缆控智能注聚新技术原理、适用性与特点的基础上,研发出缆控智能注聚工作筒、大流量下高保黏通道及地面控制器等关键配套工具。实验表明,工作筒形成节流压差小于4 MPa,保黏率大于85%,性能较好。现场应用表明,缆控智能注聚技术在大斜度井的分层注聚调试过程中,可实时反馈流量、压力、温度等监测数据,提高注聚井测调效率和油藏配注达标率,为海上油田聚驱提高采收率提供了有效的技术支撑。

关键词:海上油田;分层注聚;测调效率;大斜度;监测

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Research and application of intelligent polymer injection technology with cable control for high angle wells in offshore oilfield

ZHANG Le¹, LIU Changlong¹, KOU Lei², CHEN Zheng¹, ZHANG Lu¹, XU Yuande¹, WANG Sheng², XUE Dedong²

(1. CNOOC(China) Limited Tianjin Branch, Tianjin 300452, China;
2. CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Tianjin 300452, China)

Abstract: The single-tubing layered testing and adjustment injection process for offshore oilfields cannot meet the conditions of wells with inclinations greater than 60°. At the same time, steel wire operation is required during logging, and a single well takes six hours on average. The logging efficiency is low, and it cannot truly achieve the real-time monitoring of downhole temperature, pressure, flow rate, and injection volume adjustment. On the basis of introducing the principle, applicability, and characteristics of intelligent polymer injection technology with cable control in offshore oil fields, key supporting tools such as cable control intelligent polymer injection pipe, high viscosity maintaining channel under large flow rate, and ground controller have been developed. Experiments have shown that the pipe has better performance with a differential throttle pressure of less than 4 MPa and a viscosity retention rate of more than 85%. Field applications demonstrated that the cable-controlled smart polymer injection technology can provide real-time feedback on flow rate, pressure, temperature, and other monitoring data during the layered polymer injection debugging process in high-inclination wells. This improves the efficiency of polymer injection well testing and adjustment and the standardization rate of reservoir allocation, offering effective technical support for enhancing the recovery factor in offshore oilfield polymer flooding operations.

Keywords: offshore oil fields; stratified polymer injection; measuring and adjusting efficiency; large slope; monitoring

目前,国内外针对缆控智能分层注聚技术还未开展相关的室内研究及矿场试验,但海上油田由于大斜度井、水平井居多等特点,其研发的缆控智能分层注水技术已累计应用90多口井,缆控智能分层注

收稿日期:2023-05-08。

第一作者简介:张乐(1984—),女,硕士,高级工程师,主要从事海上油田注水工艺相关研究工作。地址:天津市滨海新区海川路2121号渤海石油大厦,邮政编码:300452。E-mail:zhangle3@cnooc.com.cn

通信作者简介:寇磊(1984—),男,硕士,工程师,主要从事海上油田采油工艺相关研究工作。地址:天津市滨海新区闸北路3号,邮政编码:300452。E-mail:ex_koulei@cnooc.com.cn

水工艺通过地面系统远程控制井下分层测调注水工作筒,实时获取注入井单层注入量、温度及压力,同时可根据配注方案快速调整各层注入量,满足油藏需求^[1-5]。该技术在实现不同注入参数长期动态监测条件下,有效降低了注入井测试的成本。鉴于此,开展海上油田缆控智能分层注聚测调技术研究,研发新型智能注聚工具实现大斜度井的分层注入,利用地面控制系统通过电缆传输相关注入配注参数,控制井筒内的缆控智能注聚工作筒边测边调^[6],从而提高注聚井测调效率和油藏配注达标率,为海上油田高效开发提供技术支撑。

1 海上油田聚驱技术现状

1.1 海上油田聚驱潜力研究

国内外针对水驱提高采收率技术的研究越来越深入,已经形成了多种分层注入工艺技术,其配套的井下工具也已完成系列化研制^[7-9]。但是注水不能很好地解决大井距深部高渗突进等非均质性问题。海上油田目前有1 000多口注水井,且注水井还在日益增多,水驱产量占总产量的94.3%。大多数产量比例达70%的主力油田已进入高含水期,海上油田稳产增产急需有效的稳油控水技术^[10]。聚合物驱是在注入水中加入少量水溶性高分子聚合物,通过增加水相黏度和降低水相渗透率来改善流度比、提高波及系数,从而提高原油采收率^[11-14]。

1.2 海上油田分层注聚存在问题

海上油田注聚工艺以单管分层注聚工艺为主,但仍存在以下问题:

- 1) 测调作业需要占井口,海上油田作业量大,作业窗口少,单井调配次数受限。
- 2) 无法在线实时监测井下配注参数,缩短配注策略响应时间,提高决策效率。
- 3) 现有配注工艺没有管柱外压力监测功能,无法直观判定井下地层注入情况。

因此,需要开展海上油田大斜度井缆控智能分层注聚技术研究,实现注聚井单层流量、压力、温度等参数的实时监测及流量控制,提高流量测调效率,保障聚合物黏度保留率,为提高海上油田采收率提供技术支撑^[15-16]。

2 缆控智能分层注聚工艺

2.1 缆控智能分层注聚系统的组成

缆控智能分层注聚系统由地面设备和井下工具组成,地面设备:中控室的控制计算机、电缆、地面控制器及井口管汇;井下工具:井下安全阀、滑套、层间隔离封隔器、过电缆定位密封、过电缆插入密封和智能注聚工作筒等组成见图1。

2.2 缆控智能分层注聚工艺原理

工艺原理:按照作业目标井分层数准备相应数量的电动注聚工作筒,完井时随分层注水管柱下入,同时下入单芯钢管电缆与各级井下电动注聚工作筒连接,地面系统通过电缆完成井下智能注聚工作筒开度调节,同时反馈实时流量、压力、温度等监测数据,实现分层注聚量自动调整。

2.3 缆控智能分层注聚配套工具创新性

1) 智能注聚工作筒:根据油藏需求,对注入井的各层段安装缆控智能注聚工作筒,各层段由层间

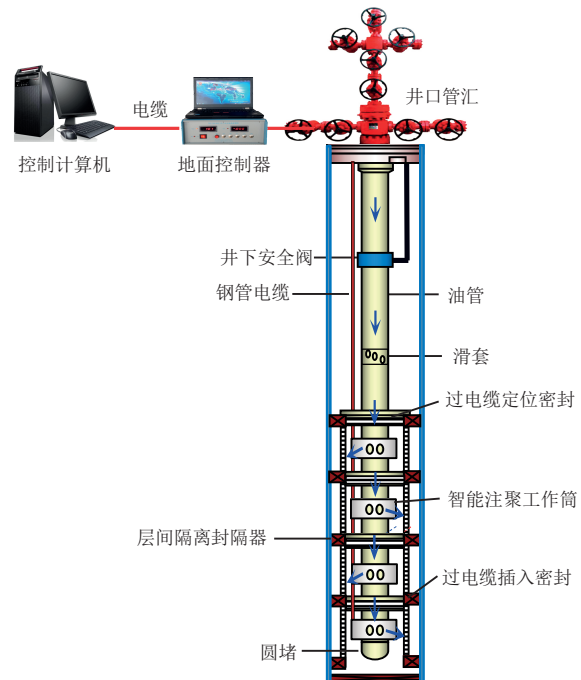


图1 缆控智能系统分层注聚测调系统
Fig. 1 Layered polymer injection and testing system of cable control intelligent system

隔离封隔器、过电缆定位密封、过电缆插入密封隔开,其内部主要组成部件为高效保黏的摩阻管(摩阻管开度调节机构实现各层注聚量调配)、实现井下参数在线监测的传感器(包含流量、压力、温度)、电缆系统。

2) 地面监控系统:在地面条件下,利用控制计算机实时记录各注入层段重要参数。当油藏配注方案进行调整时,地面上位机通过地面控制器与井下缆控智能注聚工作筒双向通信改变注入量,满足油藏需求。

3) 数据采集:温压检测电路设计,采用 $\Sigma-\Delta$ 模数转换芯片,对温度和压力传感器数据进行量化,精度更高,稳定度更好。

4) 流量调节模式:采用内外2个摩阻管设计,通过电机带动丝杠转动,实现滑动块的移动,从而带动中心摩阻管道移动,调节智能注聚工作筒的聚合物流道大小。聚合物溶液流经环形连续扩缩环空后,从智能注聚工作筒的出口流入当前层位。

2.4 缆控智能分层注聚技术特点

- 1) 适用于防砂完井和套管完井。
- 2) 能够实现井下流量、压力、温度等参数的实时监测,并可实现管柱在线验封、单层流量在线调配功能。
- 3) 最大适用井深4 000 m,不受井斜限制。
- 4) 地面控制器指令匹配平均单井2~3 h,不占用海上平台作业窗口。

3 关键工具结构设计研究

3.1 缆控智能注聚工作筒

3.1.1 缆控智能注聚工作筒创新结构设计

缆控智能注聚工作筒主要结构为:上接头、下接头、流量计、电路板、电机、中心管等组成。流量调节方面与常规的注水工具不同,采用摩阻管通道设计实现注聚流量调节,确保大流量聚合物流经调节通道后黏度。流量计选型方面由于注聚合物具有大分子和高黏度等性质,井下常用的超声波、差压、涡轮、多普勒等成熟的流量计量方式不再适用,针对聚合物的特性研制专用电磁流量计进行计量^[17]见图2。智能注聚工作筒与常规智能测调注水工作筒的结构对比见表1。

3.1.2 智能注聚工作筒技术指标

智能注聚工作筒材质上优选双向不锈钢,保证机械部分不生锈,而且具有耐冲蚀特点。

智能注聚工作筒技术参数:①外径114 mm,内径44 mm;②最高耐压60 MPa,最高耐温120 ℃;③单层最大流量600 m³/d;④流量测试精度大于等于95%;⑤保黏率大于85%。

3.1.3 智能注聚工作筒结构特点

- 1) 智能注聚工作筒选用了电磁流量计,对电磁

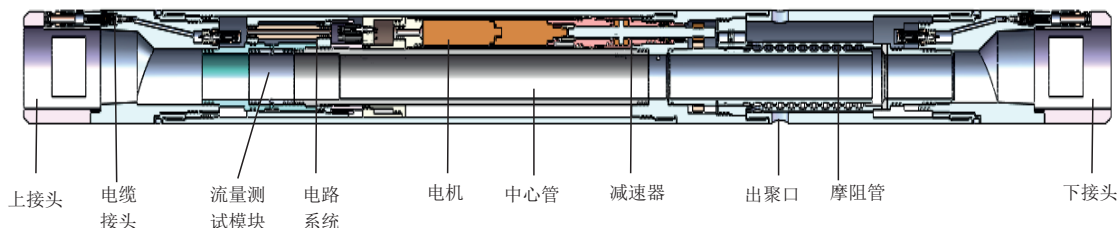


图2 缆控注聚工作筒结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of structure of cable control polymer injection pipe

表1 注水与注聚工作筒结构对比

Table 1 Comparison of structure of water injection and polymer injection working cylinders

工具结构	流量调节机构	流量调节扭矩/(N·m)	流量计量机构	参数采集机构
注水工具	调节水嘴开度改变通道大小	12	超声或差压流量计	普通A/D芯片参数由跳变现象
注聚工具	改变内外摩阻管间隙通道大小不变	36	电磁流量计	$\Sigma-\Delta$ 量化机制参数检测更稳定

流量计进行了二次密封结构设计:一次密封采用高硬度绝缘材料+O圈,防止中心通道高压液体进入电磁流量计内部;二次密封采用耐腐蚀金属+O圈,防止一次密封失效后,液体入侵工具内部,破坏工具其他电路模块,影响工具寿命。解决了普通电磁流量计井下密封困难的问题,保证仪器可靠性。

2) 流量计电路选用正弦波励磁,通过高共模抑制比差动放大器信号放大,并利用高精度模拟乘法提取流量电信号,测量范围宽、精度高,能够实现精细化聚合物流量测量。

3.2 摩阻管结构设计

摩阻管为由内摩阻管与外摩阻管组成,摩阻管保黏结构设计时,实现大注入量、高保黏的同时,保留大中心通道(内径44 mm)见图3。

3.3 地面控制系统

3.3.1 主要功能及技术参数

控制器采用防爆设计,内置计算机及测控软件可与有缆注聚工作筒配套使用,为工作筒提供可靠配套工作电源,操作指令控制有缆智能配聚器配套使用测量和控制功能。同时控制工作筒实时显示注入参数,并完成单层流量控制,自备多种过载断电保护功能^[18]。地面控制器技术参数:①工作环境温度: $-45 \sim +85 \text{ }^{\circ}\text{C}$;②供电电压: $\text{AC}220 \text{ V} \pm 15\%$, 50 Hz;③输出电流: $0 \sim 1 \text{ A}$;④最大通讯距离:4 000 m。

3.3.2 技术创新性

与常规缆控智能注水地面控制器对比:①优化信号载波传输方式,增强信号抗干扰能力;②改进信号滤波电路参数,提高滤波处理能力;③增设隔离式安全栅,提高系统的抗干扰能力;④改化输出继电器,提高输出过载保护反应速度及线路承载能力。

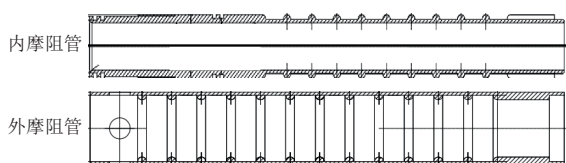


图3 保黏结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of adhesive retaining structure

3.4 缆控智能分层注聚系统性能测试试验

3.4.1 流量计精度测试试验

为了提高分层注聚井井下各层流量测试精度,开展电磁流量计在聚合物溶液中的流量精度测试试验,通过测试结果对在用电磁流量计相关参数进行修正,进而降低其测量误差,达到准确计量各层注入量的目的^[19-20]。

在聚合物中精度测试流量点设计:3、5、8、10、12、15、18、20、22、25 m^3/h 时共10个流量点。注聚工作筒水嘴开度分别设计为100%开度下进行测试试验(图4)。

在聚合物溶液中测试结果:最大误差为4.79%,最小为1.56%,平均误差为2.97%,精度测试误差范围在5%以内,可以用于注聚过程中的流量计量。

3.4.2 工作筒保黏测试试验

聚合物为常规的聚丙烯酰胺,测试质量浓度为1 500 mg/L,配液温度为 $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$,平均黏度 $45 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。设置流量为3、10、15、20、25 m^3/h ,实验过程中取样并记录摩阻管前后压力、黏度值数据(图5、图6)。

保黏率测试试验结果:缆控智能注聚工作筒在不同流量不同开度条件下,形成节流压差小于4 MPa,保黏率大于85%,性能较好。

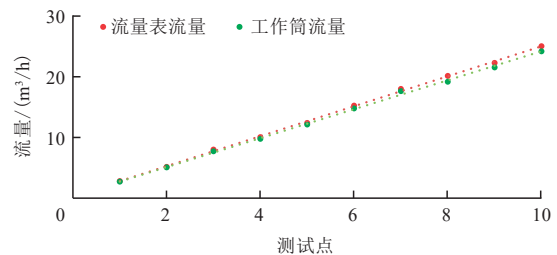


图4 流量计精度测试试验

Fig. 4 Accuracy test of flowmeter

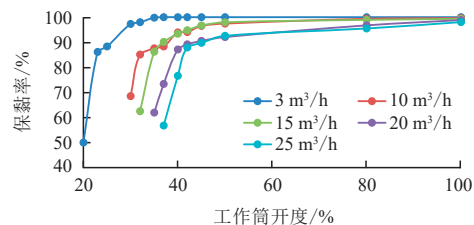


图5 不同开度、不同流量下保黏率测试试验

Fig. 5 Test of viscosity retention rate under different opening and flow rate

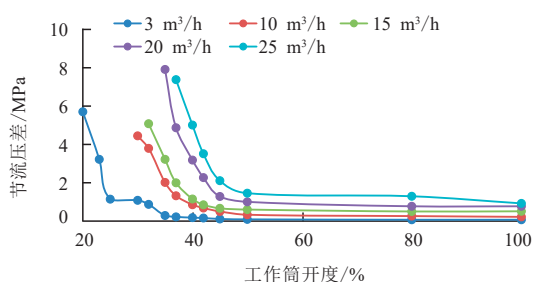


图6 不同开度、不同流量下节流压差测试试验
Fig. 6 Test of throttle pressure difference under different opening and flow rate

表2 H油田M井缆控智能注聚系统测试数据
Table 2 Test data of cable control intelligent polymer injection system for Well-M in H Oilfield

层位	配注量/(m ³ /d)	实际注入量/(m ³ /d)	水嘴开度/%
第1层	350	354	45
第2层	125	122	38
第3层	60	61	30

4 现场应用

缆控智能注聚系统目前已经在海上油田大斜度试验井做了相关的试验,试验中智能注聚工作筒调节工作稳定,流量、压力数据测试正常,配注量满足地质要求,该系统达到了设计的要求。

2023年7月,该工艺在M井实施,该井最大井斜69.7°,属于大斜度井。分注层段为3层,管柱下入后分注正常,具体配注量见表2。

5 结论

1) 缆控智能分层注聚技术有效解决了目前海上油田分层注聚井测调配注效率低、适用井斜小于60°、占用平台作业窗口等问题。

2) 创新研制了缆控智能注聚工作筒及配套地面控制器,实现了海上油田注聚井的单层流量、压力、温度等参数的实时监测及流量控制。

3) 采用的电磁流量计最大误差为4.79%,最小为1.56%,平均误差为2.97%,精度测试误差范围在5%以内,可以用于注聚过程中的流量计量。

4) 研发的缆控智能注聚工作筒在不同流量不同开度条件下,形成节流压差小于4 MPa,保黏率大于85%,性能较好。

5) 缆控智能分层注聚技术减少了注水井常规聚驱、验封测试的成本,具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 张建,张宏录.苏北高压差双管分层注水工艺技术研究及应用[J].油气藏评价与开发,2017,7(2):74-77.
ZHANG Jian, ZHANG Honglu. Research on dual string stratified injection technology with high differential pressure and its application in northern Jiangsu oilfield[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(2): 74-77.
- [2] 张宏录,张庆华,李艺玲.苏北油田分层注水工艺技术现状及对策[J].油气藏评价与开发,2011,1(3):50-53.
ZHANG Honglu, ZHANG Qinghua, LI Yiling. Current situation of layered water injection technology in northern Jiangsu oilfield and the countermeasures[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2011, 1(3): 50-53.
- [3] 石建设,顾春元,姜建胜,等.定向井分层注水工艺研究与应用[J].石油钻采工艺,2000,22(1):46-49.
SHI Jianshe, GU Chunyuan, JIANG Jiansheng, et al. Research and application of separate layer water injection technology in deviated wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2000, 22(1): 46-49.
- [4] 王延峰,邱金平,杨丽霞.分层注聚井智能测调技术[J].油气井测试,2021,30(4):50-55.
WANG Yanfeng, QIU Jinping, YANG Lixia. Intelligent regulating and testing technology for layered polymer flooding wells[J]. Well Testing, 2021, 30(4): 50-55.
- [5] 王磊.同心双管分层注聚管柱的研制与应用[J].内江科技,2018,39(2):24.
WANG Lei. Development and application of concentric double tube layered polymer injection string[J]. Nei Jiang Science & Technology, 2018, 39(2): 24.
- [6] 金振东,佟音,王凤山,等.大庆油田缆控智能分注技术工艺优化[J].石油钻采工艺,2022,44(5):600-603.
JIN Zhendong, TONG Yin, WANG Fengshan, et al. Optimization of cable-controlled intelligent separate-layer water injection technology in Daqing Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(5): 600-603.
- [7] 乔志学.缆控智能分注技术现场试验与应用[J].石油石化节能,2023,13(3):18-23.
QIAO Zhixue. Field test and application of cable intelligent sub-injection technology[J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2023, 13(3): 18-23.
- [8] 王凤山,田荃,王思淇,等.大庆油田分层注水工艺技术现状与发展趋势[J].采油工程,2022(3):1-6.
WANG Fengshan, TIAN Quan, WANG Siqi, et al. Present situation and development trend of separate layer water injection technology in Daqing Oilfield[J]. Oil Production Engineering, 2022(3): 1-6.
- [9] 郭颖,张玉坤,汪丽丽,等.缆控智能分注技术研究及应用[J].采油工程,2022(3):14-18.
GUO Ying, ZHANG Yukun, WANG Lili, et al. Research and application of cable-controlled intelligent separate layer water injection technology[J]. Oil Production Engineering, 2022(3): 14-18.

(下转第150页)

- characterization[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 13(5): 105-116.
- [27] 孔星星, 肖佃师, 蒋恕, 等. 联合高压压汞和核磁共振分类评价致密砂岩储层——以鄂尔多斯盆地临兴区块为例[J]. *天然气工业*, 2020, 40(3): 38-47.
KONG Xingxing, XIAO Dianshi, JIANG Shu, et al. Application of the combination of high-pressure mercury injection and nuclear magnetic resonance to the classification and evaluation of tight sandstone reservoirs: A case study of the Linxing Block in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(3): 38-47.
- [28] 李跃刚, 肖峰, 徐文, 等. 基于气水相对渗透率曲线的产水气井开采效果评价——以苏里格气田致密砂岩气藏为例[J]. *天然气工业*, 2015, 35(12): 27-34.
LI Yuegang, XIAO Feng, XU Wen, et al. Performance evaluation on water-producing gas wells based on gas-water relative permeability curves: A case study of tight sandstone gas reservoirs in the Sulige Gas Field, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(12): 27-34.
- [29] 潘婷婷, 张枫, 邢昆明, 等. 不同储层相对渗透率曲线归一化方法评价[J]. *大庆石油地质与开发*, 2016, 35(3): 78-82.
PAN Tingting, ZHANG Feng, XING Kunming, et al. Evaluation of the relative-permeability-curve normalizing method for the different reservoirs[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2016, 35(3): 78-82.
- [30] 马云峰, 赵建国, 孙龙, 等. 应力作用下气藏水体微观赋存特征及渗流规律——以鄂尔多斯盆地神木气田二叠系盒8段致密储层为例[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(3): 466-473.
MA Yunfeng, ZHAO Jianguo, SUN Long, et al. Microscopic occurrence characteristics and seepage law of water bodies in gas reservoir under stress: a case study of tight reservoirs in the eighth member of Permian Shihezi Formation, Shenmu Gas Field, Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(3): 466-473.
- [31] 何晨毓, 刘丽琼, 肖玉茹, 等. 鄂尔多斯盆地红河油田长8油藏效益开发地质评价参数的确定[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(4): 791-796.
HE Chenyu, LIU Liqiong, XIAO Yuru, et al. Determination of geological evaluation parameters for profitable development of Chang 8 tight oil reservoir in Honghe oil field, Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(4): 791-796.

(编辑 柳超超)

(上接第137页)

- [10] 黄泽超, 沙吉乐, 罗昌华, 等. 海上油田小井眼注聚井分层测调技术研究及应用[J]. *仪器仪表用户*, 2022, 29(4): 41-44.
HUANG Zechao, SHA Jile, LUO Changhua, et al. Research and application of layered testing and adjustment technology for polymer injection of small well-bore in offshore oilfields[J]. *Instrumentation*, 2022, 29(4): 41-44.
- [11] 咸国旗, 门海英, 王鹏, 等. 同心可调配聚器的研制与应用[J]. *石油机械*, 2019, 45(3): 98-101.
XIAN Guoqi, MEN Haiying, WANG Peng, et al. Development and application of concentric adjustable polymer injector[J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 45(3): 98-101.
- [12] 任刚. 连续调节式同心分层注入聚合物技术研究[J]. *采油工程*, 2019(4): 44-49.
REN Gang. Research on the method of improving motor driving stability of intelligent production mandrel[J]. *Oil Production Engineering*, 2019(4): 44-49.
- [13] 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.
- [14] 李兴, 石太军, 徐斌, 等. 小井眼分注井测调一体化技术研究应用[J]. *复杂油气藏*, 2019, 12(2): 81-83.
LI Xing, SHI Taijun, XU Bin, et al. Research and application of integrated logging and adjustment technology in slim-hole injection well[J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2019, 12(2): 81-83.
- [15] 赵仲浩, 黄新春, 张成富, 等. 海上油田分层采油井缆控对接式智能配产新技术[J]. *中国海上油气*, 2022, 34(4): 213-217.
ZHAO Zhonghao, HUANG Xinchun, ZHANG Chengfu, et al. A cable-controlled docking intelligent allocation technology for zonal production wells in offshore oilfields[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(4): 213-217.
- [16] 金振东. 可投捞式缆控智能分注工艺及装置分析[J]. *石油矿场机械*, 2022, 51(4): 69-75.
JIN Zhendong. Analysis of salvageable cable-controlled intelligent water injection process and device[J]. *Oil Field Equipment*, 2022, 51(4): 69-75.
- [17] 任博文, 彭梦梦, 张祥, 等. 井下分层注聚流量测量系统设计[J]. *电子技术*, 2022, 51(3): 61-63.
REN Bowen, PENG Mengmeng, ZHANG Xiang, et al. Design of downhole layered polymer injection flow measurement system[J]. *Electronic Technology*, 2022, 51(3): 61-63.
- [18] 张激扬, 刘仁勇, 郭威, 等. 缆控智能分层采油工艺技术与应用[J]. *石油矿场机械*, 2022, 51(5): 35-41.
ZHANG Jiyang, LIU Renyong, GUO Wei, et al. The research and application of cable controlled intelligent stratified oil recovery technology[J]. *Oil Field Equipment*, 2022, 51(5): 35-41.
- [19] 姜燕, 罗洪林, 张旭, 等. 管外缆控式智能分注技术[J]. *石油钻采工艺*, 2021, 43(6): 803-810.
JIANG Yan, LUO Honglin, ZHANG Xu, et al. External cable-controlled intelligent separate-layer water injection technology[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(6): 803-810.
- [20] 罗昌华, 王若璇, 王柳, 等. 渤海油田小井眼防砂注水井分层测调技术研究与应用[J]. *机械工程师*, 2019(5): 69-70.
LUO Changhua, WANG Ruoxuan, WANG Liu, et al. Research and application of separated layer testing & adjusting for sandcontrol water well with small wellbore hole in Bohai Oilfield[J]. *Mechanical Engineer*, 2019(5): 69-70.

(编辑 尹淑容)