

引用格式: 邓吉彬, 康玉阳, 严卫杰, 等. 有缆智能分层采油技术研究与现场试验[J]. 油气藏评价与开发, 2025, 15(4): 679-685.

DENG Jibin, KANG Yuyang, YAN Weijie, et al. Research and field testing of cabled intelligent stratified oil production technology[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(4): 679-685.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.04.018

## 有缆智能分层采油技术研究与现场试验

邓吉彬<sup>1</sup>, 康玉阳<sup>2</sup>, 严卫杰<sup>1</sup>, 叶红<sup>1</sup>, 张向阳<sup>2</sup>

(1. 中国石化江苏油田分公司石油工程技术研究院, 江苏 扬州 225012; 2. 中国石化江苏油田分公司采油一厂, 江苏 扬州 225265)

**摘要:** 江苏油田复杂小断块油藏以水驱分层注水开发为主, 目前采用智能分注来提升注采对应水平以提高采收率。由于采出井分层控制水平低, 分层注水受效关系、受效程度认识不清, 采油井层间干扰, 单层突进, 含水率上升快等问题突出, 为注采协同缓解高含水期层间与平面矛盾, 减少无效水循环, 控制采油井含水率上升, 研发了有缆智能分层采油技术。通过筛选适应井下高温、高压、腐蚀及结垢环境的流量、含水率、压力、温度传感器, 选用可靠的分层流量调节开关及控制技术, 合理设计组件空间布局及分层配产器整体机械结构, 选用不同的双向传输电缆及连接技术, 开发配产器控制电路及地面集成控制系统, 优化配套井下分层采油管柱, 降低工具及实施成本, 实现了井下分层生产参数的实时连续监测及对分层配产器的无线远程调控。现场开展了单层轮采、分层配产、耦合调整试验, 证实了试验前油藏动态分析结论, 验证了智能分层采油工具及管柱性能, 实现注采耦合联动、增油控水和分层测调, 试验井含水率下降38.8%。该技术的应用可为油藏精细地质分析与挖潜提供依据, 大大提高了油田采油智能化水平。

**关键词:** 采油井; 分层采油; 分层配产器; 管柱优化; 注采耦合

中图分类号: TE355

文献标识码: A

### Research and field testing of cabled intelligent stratified oil production technology

DENG Jibin<sup>1</sup>, KANG Yuyang<sup>2</sup>, YAN Weijie<sup>1</sup>, YE Hong<sup>1</sup>, ZHANG Xiangyang<sup>2</sup>

(1. Petroleum Engineering Technology Research Institute, Sinopec Jiangsu Oilfield Company, Yangzhou, Jiangsu 225012, China;  
2. No. 1 Oil Production Plant, Sinopec Jiangsu Oilfield Company, Yangzhou, Jiangsu 225265, China)

**Abstract:** The complex small fault block oilfields in Jiangsu are mainly developed through waterflooding with stratified injection. Currently, intelligent stratified injection is applied to improve injection-production coordination and enhance recovery efficiency. Due to the low level of stratified control in production wells and the unclear understanding of the relationship and degree of effectiveness of stratified water injection, issues such as interlayer interference in production wells, single-layer water breakthrough, and rapid water cut increases are prominent. To achieve injection-production coordination, alleviate interlayer and areal contradictions during the high water cut period, reduce ineffective water cycling, and control the rise in water cut of production wells, a cabled intelligent stratified oil production technology was developed. Flow rate, water cut, pressure, and temperature sensors suitable for the high-temperature, high-pressure, corrosive, and scaling-prone downhole environment were selected. Reliable stratified flow control devices and control technologies were adopted, and the spatial layout of components and overall mechanical structure of the stratified production allocator were optimally designed. Different bidirectional transmission cables and connection technologies were selected, the control circuits of the production allocator and a ground-integrated control system were developed, and the supporting downhole stratified oil production strings were optimized. Tool and implementation costs were reduced, enabling real-time continuous monitoring of downhole stratified production parameters and wireless remote control of the stratified production allocator. Field tests, including alternating single-layer production, stratified production allocation, and coupled adjustment, were conducted. The tests confirmed the conclusions of pre-test reservoir dynamic analysis and verified the performance of the intelligent stratified oil production tools and strings. Injection-production coupling, enhanced oil production, water cut control, and stratified measurement and adjustment were achieved, with the water cut of the test well reduced by 38.8%. The application of this technology can provide a basis for fine geological analysis and potential exploration of oil reservoirs, significantly enhancing the intelligent level of oilfield production.

**Keywords:** production well; stratified oil production; stratified production allocator; string optimization; injection-production coupling

收稿日期: 2024-06-14。

第一作者简介: 邓吉彬(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 现从事采油工艺技术研究应用工作。地址: 江苏省扬州市邗江区文汇西路1号, 邮政编码: 225012。E-mail: dengjb.jsyt@sinopec.com

基金项目: 江苏油田科研项目“智能注采耦合技术研究与应”(JS23019)。

江苏油田复杂小断块油藏主要开发区块以水驱开发为主。随着油田开发进入高含水期,多层系开采的难度日益增大,含水率上升成为制约采油效率的重要因素,油田目前主要采用分层注水工艺,大力发展智能分注来提高注采对应率以提高采收率。然而目前采出井分层控制水平较低,对应油井分层开采少,大多采用合层开采,产液剖面测试少或不做测试,分层注水受效关系、受效程度认识不清,难以及时准确地判断主力油层和主要产水层位,层间干扰、单层突进、含水上升快等问题突出,注采协同调整针对性较弱。为解决该难题,河南<sup>[1]</sup>、胜利<sup>[2]</sup>等油田先后研究应用了基于压力波控制的无线智能分层注采技术来实现找堵水调换层,但该技术无法实时反馈分层开采状况,不能实现井下参数的长期、有效监测。学者们<sup>[3-7]</sup>普遍认为有缆智能分层采油技术是解决上述问题的主要方向,华北、长庆、大庆、胜利等油田<sup>[8-15]</sup>及相关大学<sup>[16-20]</sup>对井下分层采油工具流量测试、无线传输等技术进行了研究,开展了分层采油工具研发,进行了智能分层采油技术应用试验,实现对井下分层流量、压力等参数实时测控,但实施成本总体较高,未实现与智能分注进行协同联动调整。与中国不同,国外智能分层采油技术多应用于高产井的智能完井,采用永置式流入控制装置(ICD)、自动流入控制装置(AICD)或液控、电控智能完井系统等<sup>[3,6-7,14]</sup>实现井下分层产液控制与调节,但系统复杂、成本高,注采协同联动较少提及。综合国内外现有技术,为实现注采协同,实施智能注采耦合,江苏油田开展有缆智能分层采油测控技术研究,通过传感器优选、工具集成设计及配套优化井下分层采油管柱,降低实施成本,开展现场试验,获得实时井下分层生产参数,实现高效、精准的分层测控与智能注采联动调整作业,为油藏精细地质分析与挖潜提供依据。

## 1 有缆智能分层采油测控与管柱技术研究

### 1.1 系统整体架构

有缆智能分层采油系统主要由地面集成控制系统、电力及信息传输电缆、分层采油管柱和分层测调配产工具(即分层配产器)四大模块构成<sup>[3-6]</sup>,见图1。地面集成控制系统连接传输电缆,经井口密封装置,下穿至井口油套环形空间,沿采油管柱油管外壁经电缆连接转换装置,将各层段的配产器连为一体,实现上下双向通信,使得电力和井口指令能迅速传至各层,井下各层段的实时流量、压力、温度等关键数据快速上传至地面集成控制系统。分层采油管柱利用封隔器实现油层分层,并汇聚各油层产液,经抽油泵采出至地面。

### 1.2 分层配产器组件技术选型与功能集成

分层测调配产模块作为井下信息采集源头及智能分层控制指令执行终端,每层配产器由井下流量、含水率、压力、温度传感器组成的参数监测系统和由微电机驱动流量调节开关共同构成。其组件技术选型与功能集成优化,决定了系统灵敏度、误差率高低和抗干扰能力,保证系统能够准确反映井下真实状况,在复杂恶劣的井下环境中持久、稳定运行。

#### 1) 分层流量监测技术

目前能用于有缆智能分层采油井下流量计量传感器包括浮子式、涡街式、差压式、超声波式流量传感器等<sup>[5,8-11]</sup>,浮子式、涡街式成本低,涡街式存在运动件易损问题;差压式、超声波式成本较高,差压式适合监测大流量,超声波式不能监测含气较高的井况。

综合考虑井下高温、高压、腐蚀、结垢、单井产液等工况,选用单层流量测量范围介于0~50 m<sup>3</sup>/d、测量误差小于等于5%的浮子式流量传感器。

#### 2) 分层含水率监测技术

目前,测量含水率的传感器有电容式、阻抗式、微波式<sup>[5,11,16]</sup>,电容式仅低含水率工况精度较高,阻抗式测量范围较小,微波式可兼顾高含水率和测量范围。综合考虑井下工况,选定结构简单、安装方便、环境适应性较好的微波式含水率传感器作为分层含水率监测主要技术。

微波式含水率传感器利用微波在不同含水原油中传

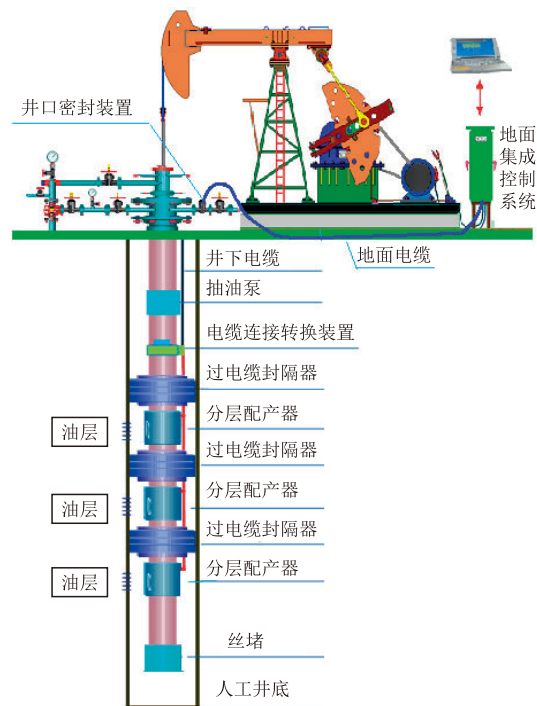


图1 有缆智能分层采油系统

Fig. 1 Cabled intelligent stratified oil production system

输速度不同的原理来检测含水率。微波传输的速度公式如下:

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (1)$$

式中: $V$ 为微波传输的速度,单位m/s; $C$ 为光速,单位m/s; $\epsilon$ 为微波通过原油的介电常数; $\mu$ 为原油的磁导率,单位H/m。

油、水磁导率值均为1,不含水原油介电常数为2.2,地层水介电常数约为80,不同介电常数对应不同含水率,传感器测量出通过原油的微波速度即可测得含水率。

### 3) 分层压力、温度监测技术

分层压力、温度监测由配产器管内、管外压力传感器和温度传感器组件来完成<sup>[10-11]</sup>。每层配产器公用流道处测得的压力为内压,外压为该层地层压力。分层压力、温度实时监测可洞悉油层动态变化,为制定及调整开采策略提供支持。

根据江苏油田井深和油藏温度情况,压力传感器选用接触应变型,量程介于0~60 MPa,精度为1%FS(满量程),测量误差小于等于0.06 MPa;温度传感器选用接触热敏电阻型,量程介于-20~150 °C,测量误差小于等于0.5 °C。

### 4) 分层流量调节开关及其控制技术

分层流量调节开关是实现单层流量精细控制的关键组件,通常采用一体化可调阀门结构,主要由直流电机、减速器、联轴器、传动轴、行程开关及霍尔传感器、进出液阀门、密封组件等组成。

按进出液阀门的开关方式<sup>[5,10-11,16-17]</sup>,分层开关可分为旋转式和直线式往复可调开关。

旋转式开关采用旋转式进液阀门,通过编程控制电机轴的旋转角度来控制进液阀门的开度大小,实现配产器开度可调及进液量控制。直线式开关采用直线式进液阀门,通过控制电机正/反转来控制进液阀门开/关,通过控制丝杠前进的距离来控制进液阀门开度大小,实现配产器开度可调及进液量控制。与旋转式相比,直线式开关的电机经减速器输出速度高,对电机的编程控制要求低,但运动部件多,阻力较大,占用空间大。

根据江苏油田井深及油藏温度范围,充分考虑控制、编程难易程度,选用直线式往复可调开关作为配产器流量调节开关的控制技术。核心部件微电机和减速器选用瑞士进口电机,最高工作温度为125 °C,供电电压为48 V,扭矩最高可达6 N·m。

### 5) 分层配产器一体化设计与功能集成

基于各传感器及分层开关组件尺寸,充分考虑进液、过流、密封、防砂、检测设置等功能需求,优化组件布置空

间,设计了分层采油配产器整体机械结构,见图2。

基于传感器及分层开关控制技术选型,设计了分层采油配产器控制电路,电路原理见图3。分层配产器将层信息、分层开度信息及各传感器测得的流量、含水率、压力、温度数据经编码电路编码后耦合至井下传输电缆上,井下电缆载波实时传输至地面控制器进行解析。地面控制器将指令信息编码耦合至电缆并发送至配产器,经分层解码电路滤波处理后,传送至该层微控制器并执行相应命令。

经一体化设计与功能集成,实现了分层采油配产器检测、配产等功能。配产器最大工作压力可达60 MPa,最高工作温度为125 °C,最大外径为114 mm,仪器长度为1 800 mm,进液开关开启压差可达25 MPa,电缆供电,直读式数据读取,开度调节范围介于0~100%。

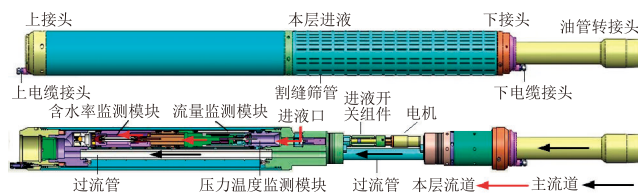


图2 有缆智能分层采油配产器机械结构  
Fig. 2 Mechanical structure of cabled intelligent stratified oil production allocator

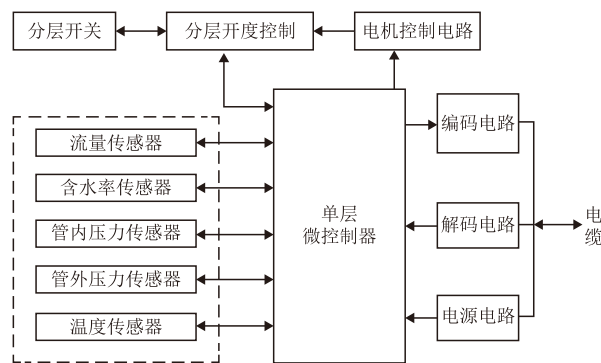


图3 有缆智能分层采油配产器控制电路原理  
Fig. 3 Control circuit for cabled intelligent stratified oil production allocator

## 1.3 井筒电力及信息传输技术

该技术通过配置不同型号、材质的电缆,配套电缆护卡,安装电缆连接转换装置,实现井下设备与地面设备间有效的电力供给与信息交互。

电缆连接转换装置可分为密封连接器、湿连接装置和无线连接装置3种类型<sup>[11,14-15,18-21]</sup>。密封连接器将油管外上、下2根电缆用连接器直接相连实现密封、供电、通信,连接简单可靠;湿连接装置连接在油管上,上、下部电缆分别接入湿连接公、母头,对接时公头插入母头实现

密封及电缆连接,完成供电通信;无线连接装置连接与湿连接类似,上、下部电缆分别连接带线圈的公、母头,通过电磁耦合实现无线供电通信。

在连接转换装置下部工具段,选用抗磨损、抗拉伸、防护性能好、价格较高的直径4 mm的钢管电缆,钢管电缆连接器进行分层连接、密封,安装伸缩补偿器、电缆护卡保护钢管电缆。

在连接转换装置上部井段至地面,采用成本较低的直径8 mm的塑皮铠装电缆,使用电缆护卡防缠绕及磨损。井下电缆至井口时先连接井口密封装置,再连接地面控制系统。

#### 1.4 井下分层采油管柱优化

井下分层采油管柱通过下入密封可靠的封隔器将油井划分为若干个独立的生产层段,确保各层段间的开采互不影响,防止层间窜流。

根据管柱结构和电缆连接转换装置类型,井下分层采油管柱可分为分体式与一体式管柱两大类<sup>[5,11,15,21-23]</sup>。分体式管柱分为湿对接(图4)、无线对接(图5)、插管式分体管柱(图6);一体式管柱见图7。4种分层采油管柱对比见表1。

一体式管柱要求泵固定阀实现过流。杆式泵过流要求采用动筒式杆式泵,固定阀及游动阀均在打压坐封封隔器后随抽油杆下入。管式泵过流需对泵固定阀进行改进,改进方式有2种:①打压入座方式:将原泵固定阀更换为过流泄压阀<sup>[22]</sup>,或在原固定阀下增加压差滑套,使固定阀

球顶起形成过流通道,先通过油管打压过流坐封封隔器,后继续打压使过流泄压阀或压差滑套下移使固定阀球入座,再下连接抽油杆的柱塞实现抽油。②撞击入座方式:将管式泵固定阀换成过流倒置阀、过流洗井三作用阀<sup>[24]</sup>、射采联作泵阀或可打捞固定阀,留置过流通道,通过油管打压过流坐封封隔器后,随抽油杆下入柱塞,通过柱塞撞击,使固定阀下移入座,同时堵塞过流通道,实现抽油。

根据江苏油田定向井、大斜度井多,杆式泵应用较少,着重考虑安全和成本因素,优选应用一体式分层采油管柱,采用“管式泵+过流倒置阀”实现过流。

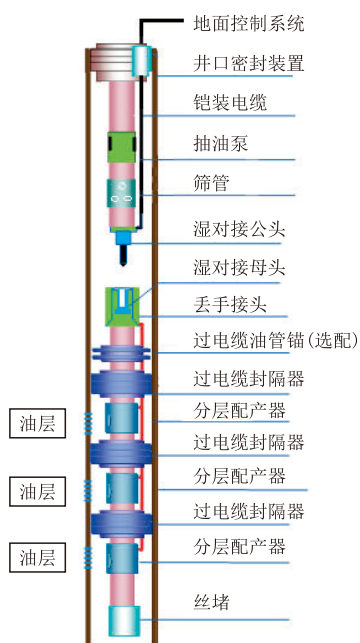


图4 湿对接分体管柱

Fig. 4 Wet docking split string

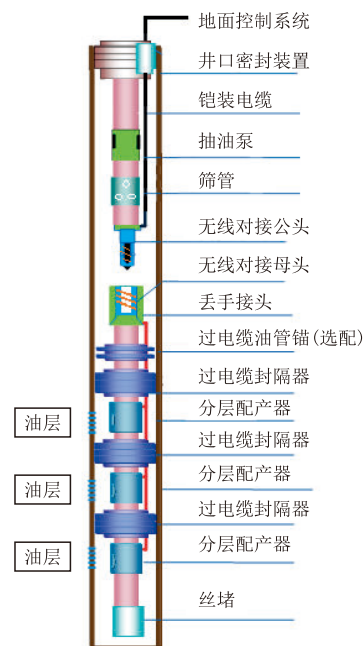


图5 无线对接分体管柱

Fig. 5 Wireless docking split string

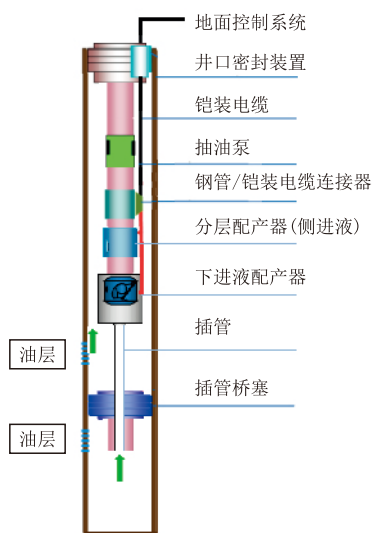


图6 插管式分体管柱

Fig. 6 Tubing-connected split string

表1 4种分层采油管柱对比  
Table 1 Comparison of four stratified oil production strings

采油管柱类型	传输连接方式	分层数	封隔方式	泵类型	作业需求	实施成本	优点	缺点
湿对接分体管柱	湿连接	≥2	过电缆封隔器	常规泵	两趟管柱	较高	检泵便捷,下部管柱可复用	可能漏电,斜井易撞击、磨损
无线对接分体管柱	无线对接	≥2	过电缆封隔器	常规泵	两趟管柱	高	检泵便捷,下部管柱可复用	斜井易撞击、磨损
插管式分体管柱	密封连接器	2	插管桥塞	常规泵	两趟管柱	低	工艺简单,不易漏电,适应性较广	需要改造下层配产器,多层不适用
一体式管柱	密封连接器	≥2	过电缆封隔器	杆式泵、改进管式泵固定阀	一趟管柱	较低	安全性高,适应性广	检泵繁琐,下部管柱不可复用

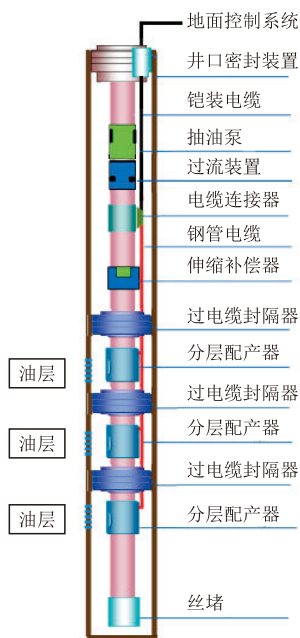


图7 一体式管柱  
Fig. 7 Integrated string

### 1.5 地面集成控制系统开发

地面集成控制系统作为有缆智能分层采油技术的控制中心,负责主要的设置、输入、输出<sup>[13-14]</sup>,集成了供电电源、编解码电路、主控电路,采用总线寻址方式,最多可同时连接、控制8个井下分层配产器。每个分层配产器下井之前,需要连接上位机软件,通过USB通信按下层位顺序进行仪器地址编号,地面控制器能根据仪器地址接收、发送井下不同层位的测量数据,并进行自动控制,与井下分层配产器的可靠通信距离超过4 km。

地面集成控制系统主要功能包括:①供电。②编解码:接收上位机命令,编码发送至井下分层配产器,并接收、解码其反馈。③监控:支持手动或自动测调和采集,实现长期、实时分层监测与智能化调节。④无线远传数

据终端(DTU):实现与终端室的远程无线双向数据传输。

⑤存储:本地存储各层监测数据。

## 2 现场试验

有缆智能分层采油技术在江苏油田进行了应用试验。试验井C2-14井斜深为2 308.00 m,垂深为2 097.73 m,最大井斜为38°,油层温度为73 °C,措施前生产 $Ef_3^1$ (下第三系阜宁组阜三段第1油层组)油层组的19、20号层和 $Ef_3^2$ (下第三系阜宁组阜三段第2油层组)油层组的24、25、26、27、29号层, $Ef_3^1$ 油层组无对应注水井, $Ef_3^2$ 油层组对应注水井为智能分注C2-6井(井距220 m)、C2-13井(井距460 m)。措施前油藏动态分析认为 $Ef_3^2$ 油层组25、26、27、29号层为高含水层,主要产油层为 $Ef_3^1$ 油层组的19、20号层和 $Ef_3^2$ 油层组的24号层,按照注采联动方案将该井19、20号层、24号层(对应注水井C2-6、C2-13井的2号砂体)作为上层,25、26号层(对应注水井C2-6、C2-13井的4号砂体)、27号层(对应注水井C2-6、C2-13井的5号砂体)、29号层(对应注水井C2-13井的6号砂体)作为下层,分2套层进行有缆分层采油现场试验,分层采油管柱应用一体式2层管柱,采用“管式泵+过流倒置阀”实现过流。

2024年2月该井实施分层采油作业,施工监测曲线见图8。从内、外压监测曲线可以看到,该井施工通过油管正打压,按设计方案实施了3次逐级打压,油管内、外压差达10~15 MPa,每次稳压15 min坐封封隔器来保证油层2个封隔器完全坐封。稳压过程中及泄压后检查2个配产器的内、外压值,外压与内压不同即表示封隔器坐封完成,验封合格。由于可实时监测井底封隔器内外压力,常规封隔器坐封作业难以判断的打压坐封、验封情况一目了然;同时,可将按常规作业设计的3次打压、稳压坐封、验封过程简化为1次打压、稳压完成坐封、验封,可减少施工压力、工序和施工时间。

该井完成分层采油作业后,首先按照从下往上的顺序,实施单层轮采,根据单层轮采监测结果实施分层配产。该井分层采油试验前、后生产情况见表2。

单层轮采阶段:监测结论为上层为主力产油层,日产液量低,含水率较低,油层压力低,分层开关开度应设置为100%全打开;下层日产液量、含水率较高,油层压力高,需对该层限制生产。单层轮采验证了措施前的“上层为主要产油层,下层为高含水层”的地质认识,通过井口液量计量和化验分析含水率,验证了井下分层产液参数监测的准确性。

分层配产阶段:根据单层轮采情况实施分层配产,由

于上、下2层油层压力相差达7 MPa,显示了明显的层间差异,实施分层配产时下层压力严重压制了上层出液,目前主采上层(上层开度为100%,下层开度为30%),日产液量为2.8 m<sup>3</sup>,日产油量为1.4 t,含水率为51.2%。

注采耦合调整阶段:为提升注采对应效果,实施注采耦合联动调整,将智能分注C2-6井对应C2-14井上层的注入段注水量提高10 m<sup>3</sup>,目前C2-14井上层外压由降转升,日产油量上升。

与多层笼统合采阶段对比,目前日产液量下降10.4 m<sup>3</sup>,日产油量微增,含水率降低38.8%,少产水节约了举升动力、污水处理及回注的费用。

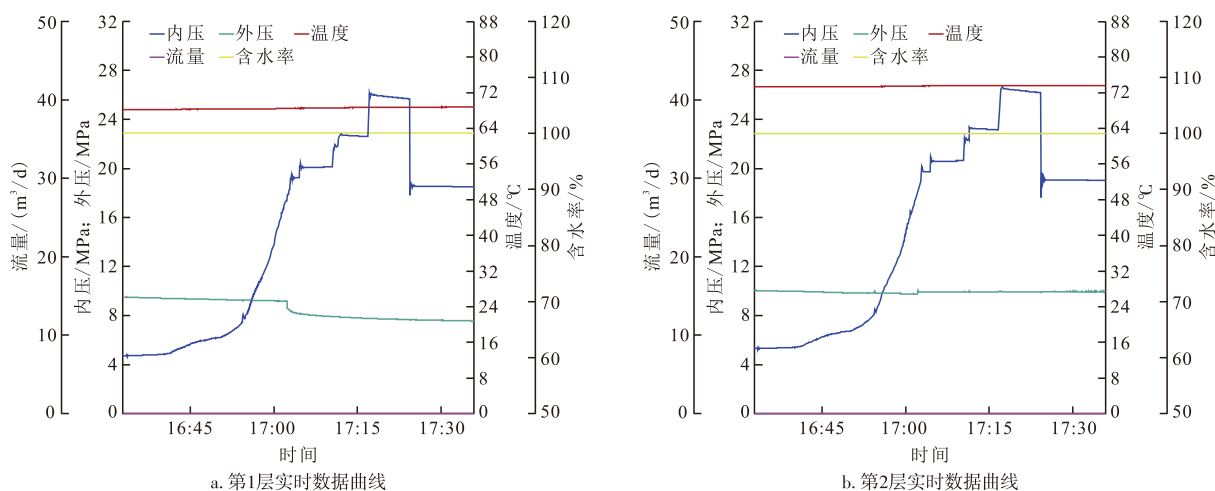


图8 C2-14井有缆智能分层采油施工监测

Fig. 8 Operation monitoring of cabled intelligent stratified oil production in well C2-14

表2 有缆智能分层采油试验前、后生产情况

Table 2 Production status before and after cabled intelligent stratified oil production tests

时间	开采层	日产液量/m <sup>3</sup>	含水率/%	上层内压/MPa	上层外压/MPa	下层内压/MPa	下层外压/MPa	上层开度/%	下层开度/%
措施前	多层合采	13.2	90.0						
2024年3月	单采下层	11.0	95.0	6.95	4.91	7.37	7.42	0	100
2024年3月	单采上层	2.0	47.7	2.61	2.64	2.94	9.89	100	5
2024年4月	分层配产	4.0	80.0	2.50	2.52	2.97	9.77	100	42
2024年5月	分层配产	1.7	42.0	2.36	2.38	2.88	11.29	100	25
2024年7月	分层配产	2.8	51.2	2.45	2.49	2.53	9.38	100	30

### 3 结论及建议

1) 通过合理的组件技术选型、功能集成和管柱优化设计,降低了有缆智能分层采油工具和工艺实施成本。现场试验验证了一体化设计及功能集成的智能分层配产器的传感器、电路、机械性能,验证了井下分层采油管柱工艺的可靠性,达到了试验目的。

2) 有缆智能分层采油技术可远程、连续、实时监测和调控井下分层产液量、含水率、压力等参数,为油田高

含水开发后期清晰认识层间矛盾,充分发挥各油层产油能力,减少无效水循环,挖掘剩余油提高采收率提供数字化、智能化手段;可结合智能分注技术,实现注采耦合同步调整、联动优化;技术实施可降低油井产液剖面测试、找堵水作业成本和人工成本,可节约举升动力、污水处理及回注的费用,起到增油、控水、降本综合作用。

3) 有缆智能分层采油技术是数智化油田建设实现井下智能的主要方向,该技术的不断创新和完善,将为油田的高效、可持续开发提供有力支持,具有广阔的应用前景和发展潜力。

参考文献

- [1] 张景辉,马宏伟,王小勇,等.油田井下智能注采工艺技术:油田勘探与开发国际会议论文集[C].成都:《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志有限公司,2020.  
ZHANG Jinghui, MA Hongwei, WANG Xiaoyong, et al. Intelligent injection and production technology of oilfield: Proceedings of the International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development[C]. Chengdu: Electronic Journal Co., Ltd. of China Academic Journal (CD Edition), 2020.
- [2] 贾庆升.无线智能分层注采技术研究[J].石油机械,2019,47(7):99-104.  
JIA Qingsheng. Intelligent separate layer injection and production technology based on wireless telemetry[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(7): 99-104.
- [3] 檀朝东,刘合,高小永,等.中国陆上油气田生产智能化现状及展望[J].前瞻科技,2023,2(2):121-130.  
TAN Chaodong, LIU He, GAO Xiaoyong, et al. Current situation and prospects of intelligent production in onshore oil and gas fields in China[J]. Science and Technology Foresight, 2023, 2(2): 121-130.
- [4] 王岩.基于油田发展阶段的分层采油技术研究[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(9):196-198.  
WANG Yan. Research on layered oil recovery technology based on oilfield development stage[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2023, 43(9): 196-198.
- [5] 张激扬,欧海晨,师国臣,等.油水井井筒数字化、智能化构建分析[J].石油钻采工艺,2022,44(5):569-573.  
ZHANG Jiyang, OU Haichen, SHI Guochen, et al. Analysis on digital and intelligent construction of wellbore for oil and water wells [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(5): 569-573.
- [6] 刘合,郑立臣,杨清海,等.分层采油技术的发展历程和展望[J].石油勘探与开发,2020,47(5):1027-1038.  
LIU He, ZHENG Lichen, YANG Qinghai, et al. Development and prospect of separated zone oil production technology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 1027-1038.
- [7] 聂飞朋,王登庆,田俊,等.国内外智能分层注采技术现状及发展趋势[J].内蒙古石油化工,2020,46(11):78-79.  
NIE Feipeng, WANG Dengqing, TIAN Jun, et al. Current situation and development trend of intelligent layered injection and mining technology at home and abroad[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2020, 46(11): 78-79.
- [8] 李越,杨树坤,廖朝辉,等.井下智能配产器测试模块结构优化及评价[J].石油钻采工艺,2022,44(4):494-499.  
LI Yue, YANG Shukun, LIAO Zhaohui, et al. Structure optimization and evaluation of the testing module of intelligent downhole production allocator[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(4): 494-499.
- [9] 安俊桥,巩永良,赵钰峰,等.采油井分层监测及产液控制技术研究与应用[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(11):166-167.  
AN Junqiao, GONG Yongliang, ZHAO Yufeng, et al. Research and application of layered monitoring and fluid production control technology of oil production wells[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2021, 41(11): 166-167.
- [10] 刘建升,牛晨辉,程翔,等.智能分层采油技术在姬塬油田H油藏的应用[J].石油化工应用,2023,42(4):76-79.  
LIU Jiansheng, NIU Chenhui, CHENG Xiang, et al. Application of intelligent stratified oil recovery technology in H reservoir of Jiyuan Oilfield[J]. Petrochemical Industry Application, 2023, 42(4): 76-79.
- [11] 张激扬,刘仁勇,郭威,等.缆控智能分层采油工艺技术研究与应 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.
- [12] 刘香山,宋辉辉,张福涛,等.海上油田智能注采工艺技术研究与 应用[J].石油工程建设,2020,46(增刊1):237-241.  
LIU Xiangshan, SONG Huihui, ZHANG Futao, et al. Research and application of intelligent injection and production technology in offshore oilfields[J]. Petroleum Engineering Construction, 2020, 46 (Suppl. 1): 237-241.
- [13] GUO W, SHI S S, LIU C J, et al. The research and application of cable controlled intelligent stratified oil recovery technology NSTL [C]// IFEDC. Integration of Geology and Engineering to Improve the Efficiency of Exploration and Development of Complex Oil and Gas Reservoirs, Xi'an, 2022.
- [14] LIAO C L, JIA D L, YANG Q H, et al. An intelligent separated zone oil production technology based on electromagnetic coupling principle NSTL[C]// Paper SPE-215238-MS presented at the SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, October 2023.
- [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] 白永鑫.分层采油流量调节与控制方法研究[D].西安:西安石油大学,2021.  
BAI Yongxin. Study on flow measurement technology of multiphase flow frequency difference method[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021.
- [17] 侯田博文.分层采油井下组合配产器的产量耦合模型与阀口参数优化[D].秦皇岛:燕山大学,2017.  
HOU Tianbowen. Layered oil down-hole combination of proration production coupling model and the valve port parameters optimization [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [18] 郭军.井下谐振式无线电能传输系统的线圈优化[D].荆州:长江大学,2023.  
GUO Jun. Optimisation of coils for downhole resonant wireless power transmission systems[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2023.
- [19] 程成.分层采油多井多储层传输技术研究[D].西安:西安石油大学,2021.  
CHENG Cheng. Study on measuring system of crude oil moisture content and temperature effect by high frequency electromagnetic method[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021.

- efficiency in hydraulically-fractured tight reservoirs[C]//Paper SPE-185062-MS presented at the SPE unconventional resources conference, Calgary, Alberta, Canada, February 15-16, 2017.
- [25] 彭君,周勇水,李红磊,等.渤海湾盆地东濮凹陷盐间细粒沉积岩岩相与含油性特征[J].断块油气田,2021,28(2):212-218.  
PENG Jun, ZHOU Yongshui, LI Honglei, et al. Lithofacies and oil-bearing characteristics of fine-grained sedimentary rocks of salt-layers in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(2): 212-218.
- [26] 张建国,姜在兴,刘立安,等.渤海湾盆地沾化凹陷沙河街组三段下亚段细粒沉积岩岩相特征与沉积演化[J].石油学报,2021,42(3):293-306.  
ZHANG Jianguo, JIANG Zaixing, LIU Li'an, et al. Lithofacies and depositional evolution of fine-grained sedimentary rocks in the lower submember of the Member 3 of Shahejie Formation in Zhanhua sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(3): 293-306.
- [27] 周立宏,韩国猛,杨飞,等.渤海湾盆地歧口凹陷沙河街组三段一亚段地质特征与页岩油勘探实践[J].石油与天然气地质,2021,42(2):443-455.  
ZHOU Lihong, HAN Guomeng, YANG Fei, et al. Geological characteristics and shale oil exploration of Es<sup>3(1)</sup> in Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(2): 443-455.
- [28] 张睿,宁正福,杨峰,等.页岩应力敏感实验与机理[J].石油学报,2015,36(2):224-231.  
ZHANG Rui, NING Zhengfu, YANG Feng, et al. Shale stress sensitivity experiment and mechanism[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(2): 224-231.
- [29] 焦春艳,何顺利,谢全,等.超低渗透砂岩储层应力敏感性实验[J].石油学报,2011,32(3):489-494.  
JIAO Chunyan, HE Shunli, XIE Quan, et al. An experimental study on stress-dependent sensitivity of ultra-low permeability sandstone reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 489-494.
- [30] LI M, SU Y L, DONG M Z, et al. A numerical study of fluids desorption and phase behavior in shale oil reservoir using a chemical reaction model[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 196(8): 108050.
- [31] 张明山.页岩油溶解气驱实验研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2018.  
ZHANG Mingshan. Experimental study on solution gas drive in shale [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018.
- [32] 郑玲丽,王思慧,肖文联,等.四川盆地南部地区须家河组致密砂岩应力敏感性特征[J].油气地质与采收率,2024,31(6):1-10.  
ZHENG Lingli, WANG Sihui, XIAO Wenlian, et al. Stress sensitivity characteristics of tight sandstone of Xujiahe Formation in southern part of Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(6): 1-10.
- [33] 田玉明.致密砂岩气藏储层应力敏感性研究[D].北京:中国石油大学(北京),2017.  
TIAN Yuming. Study on stress sensitivity of tight sandstone gas reservoirs[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [34] 周立宏,赵贤正,柴公权,等.陆相页岩油效益勘探开发关键技术与工程实践:以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔二段为例[J].石油勘探与开发,2020,47(5):1059-1066.  
ZHOU Lihong, ZHAO Xianzheng, CHAI Gongquan, et al. Key exploration & development technologies and engineering practice of continental shale oil: A case study of Member 2 of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 1059-1066.
- [35] 赵贤正,蒲秀刚,周立宏,等.深盆湖相区页岩油富集理论、勘探技术与前景:以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例[J].石油学报,2021,42(2):143-162.  
ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, ZHOU Lihong, et al. Enrichment theory, exploration technology and prospects of shale oil in lacustrine facies zone of deep basin: A case study of the Paleogene in Huanghua depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 143-162.

(编辑 柳超超)

(上接第685页)

- [20] 王新亚.有缆智能分层采油系统井下通信技术研究[D].西安:西安石油大学,2021.  
WANG Xinya. Research on downhole communication technology for intelligent layered oil production with cable [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021.
- [21] 郑忠博.水平井缆控分层采油及测试一体化工艺[J].油气井测试,2020,29(1):28-34.  
ZHENG Zhongbo. Integrated technology of cable controlled stratified oil production and testing in horizontal well[J]. Well Testing, 2020, 29(1): 28-34.
- [22] 付亚荣,陈劲松,张睿荫,等.分层测试和分层采油联作技术[J].石油石化节能,2022,12(3):14-16.  
FU Yaron, CHEN Jinsong, ZHANG Ruiyin, et al. Combined technology of layered testing and layered oil production[J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2022, 12(3): 14-16.
- [23] 孟祥海,夏欢,李彦阅,等.智能分注分采技术应用效果及其影响因素研究[J].当代化工,2022,51(1):156-159.  
MENG Xianghai, XIA Huan, LI Yanyue, et al. Research on application effect and influencing factors of intelligent separate injection and production technology[J]. Contemporary Chemical Industry, 2022, 51(1): 156-159.
- [24] 陈碧波.热洗清蜡油层保护抽油管柱的研制与应用[J].内江科技,2015,36(8):34.  
CHEN Bibo. Development and application of hot cleaning wax oil layer to protect sucker rod string[J]. Nei Jiang Science Technology, 2015, 36(8): 34.

(编辑 李青)