

# 短水平井光电成像与井间示踪一体化找水技术

张晶宇<sup>1</sup>, 林艳波<sup>2</sup>, 贺彤彤<sup>3</sup>, 黄平<sup>1</sup>, 代波<sup>2</sup>, 孙小艳<sup>4</sup>

1. 中国石油集团测井有限公司长庆分公司 陕西西安 710299

2. 中国石油长庆油田分公司第一采油厂 陕西西安 710200

3. 中国石油长庆油田分公司第九采油厂 宁夏银川 750005

4. 中国石油集团测井有限公司地质研究院 陕西西安 710061

项目支持: 中国石油集团测井有限公司科学研究与技术开发项目“生产测井装备研制与配套”(CNLC2023-6A01); 中国石油集团测井有限公司科学研究与技术开发项目“资源勘探测井评价研究”(CNLC2025-9B)

引用: 张晶宇, 林艳波, 贺彤彤, 等. 短水平井光电成像与井间示踪一体化找水技术[J]. 油气井测试, 2026, 35(2): 66-71.

Cite: ZHANG Jingyu, LIN Yanbo, HE Tongtong, et al. An integrated water locating technology based on optoelectric imaging and inter-well tracing for short horizontal wells[J]. Well Testing, 2026, 35(2): 66-71.

**摘要** 长庆油田低渗透、特低渗透油藏采用短水平井开发时面临高含水、水窜通道不明、产水层位定位难等问题, 严重制约油井产能释放与开发效益提升。整合分布式光纤测井、阵列流动成像测井及井间微量物质示踪三种技术, 采用光电复合缆+爬行者输送的一体化施工工艺, 实现光纤测井与流动成像测井同步作业, 构建“光纤+成像精准定位产水段+示踪剂溯源来水方向”的一体化找水技术体系。经现场应用, 成功定位新1井第4~7段为主力产水段, 实施隔采控水措施后, 日产液12.24 t, 产油2.2 t, 含水由99%下降至82.02%。该技术可精准识别短水平井产水层位、量化各层产液贡献率、清晰判定注采连通关系与水驱推进路径, 在低渗透油藏短水平井找水领域具备推广应用价值。

**关键词** 长庆油田; 短水平井; 生产测井; 光纤; 流动成像; 示踪剂; 找水技术

中图分类号: TE358

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2026.02.010

## An integrated water locating technology based on optoelectric imaging and inter-well tracing for short horizontal wells

ZHANG Jingyu<sup>1</sup>, LIN Yanbo<sup>2</sup>, HE Tongtong<sup>3</sup>, HUANG Ping<sup>1</sup>, DAI Bo<sup>2</sup>, SUN Xiaoyan<sup>4</sup>

1. Changqing Branch, China National Logging Corporation, Xi'an, Shaanxi, 710299, China

2. No. 1 Oil Production Plant, Changqing Oilfield Branch, China National Petroleum Corporation, Xi'an, Shaanxi 710200, China

3. No. 9 Oil Production Plant, Changqing Oilfield Branch, China National Petroleum Corporation, Yinchuan, Ningxia 750005, China

4. Geological Research Institute, China National Logging Corporation, Xi'an, Shaanxi 710061, China

**Abstract:** During the development of low and ultra-low permeability reservoirs in the Changqing oilfield using short horizontal wells, challenges such as high water cut, unclear water channeling paths, and difficulties in locating water-producing intervals severely restrict the unleash of well productivity and the enhancement of development efficiency. To address these issues, an integrated water-locating technology system was established by combining three technologies: distributed fiber-optic logging, array flow imaging logging, and inter-well micro-substance tracing. By employing an integrated operation process utilizing a composite optoelectric cable conveyed by a downhole tractor, the synchronized operation of fiber-optic logging and flow imaging logging is realized. This forms a comprehensive system characterized by "accurately locating water-producing intervals via fiber-optics and imaging, combined with tracing the direction of water sources via tracers." Field applications successfully identified stages 4 to 7 of well Xin 1 as the primary water-producing intervals. Following the implementation of zonal isolation and water control measures, the well achieved a daily fluid production of 12.24 t and a daily oil production of 2.2 t, with the water cut dropping significantly from 99% to 82.02%. This technology can accurately identify water-producing intervals in short horizontal wells, quantify the fluid production contribution of each interval, and clearly determine the injection-production connectivity as well as the advancing path of the water drive. This technology holds significant value for broader application in water-locating operations for short horizontal wells within low-permeability reservoirs.

**Keywords:** Changqing oilfield; short horizontal well; production logging; fiber optics; flow imaging; tracer; water locating technology

长庆油田是国内超低渗透油气藏开发主力区块,其短水平井凭借单井控制储量大、泄油面积广的优势,已成为主力开发井型。但受储层非均质性强、天然微裂缝发育、注水驱替不均衡等地质因素影响,短水平井开发初期极易出现局部水窜、全域高含水现象,部分油井含水率甚至突破95%,出现“见水快、控水难、产量降”的开发困境。短水平井井眼轨迹特殊、井筒流态复杂,传统点式测井、常规注水调控手段难以精准定位产水层位、溯源来水方向,成为制约油田高效开发的核心技术瓶颈。

国内外针对水平井找水技术开展了大量研究与实践:国外依托高端成像测井、光纤传感装备,形成了以阵列成像、分布式监测为主的精细化找水体系,适用于高渗、均质油藏,但成本高昂且适配性不足;国内聚焦低渗透油藏特点,研发了同位素示踪、电容/电阻持水率测井等技术,虽一定程度缓解找水难题,但在短水平井小井眼、大斜度、多相流工况下,存在监测盲区大、数据精度低、解释多解性强等缺陷。

结合长庆油田低渗透油藏短水平井开发需求,本文将分布式光纤、阵列流动成像与井间微量示踪技术有机结合,形成井下定位与油藏溯源相结合的一体化找水方法。通过现场应用验证,该组合技术可有效识别产水层位、明确来水方向、量化分层产出贡献,可为同类油藏控水增油与开发调整提供实用技术参考。

## 1 一体化技术原理

本文研究将分布式光纤测井、阵列流动成像测井、井间微量物质示踪三项技术进行有机融合,形成适用于短水平井的一体化找水技术体系。三类技术分别从井筒连续监测、截面流动成像、油藏运移溯源三个维度互补支撑,共同实现产水层精准定位与来水方向清晰判定。以下分别阐述各项技术的工作原理。

### 1.1 分布式光纤测井技术原理

分布式光纤测井技术以单根光纤为传感与传输载体,无需井下供电,抗电磁干扰、耐高温高压,可实现井筒全井段连续、无盲区监测,核心分为分布式温度传感(DTS)与分布式声波传感(DAS)两大模块,二者协同实现产水层精准识别<sup>[1-2]</sup>。

#### 1.1.1 分布式温度传感(DTS)原理

DTS技术基于光纤拉曼散射效应与光时域反射

(OTDR)原理工作<sup>[3]</sup>,向光纤中发射激光脉冲,脉冲传输过程中与光纤分子相互作用产生斯托克斯光与反斯托克斯光,两种散射光的强度比值与光纤所处环境温度呈精确线性关系;通过测算激光发射与背向散射光接收的时间差,可精准定位温度异常点位置。

在短水平井找水应用中,地层原油与注入水存在温度差,产水层位流体流入井筒后会引发局部温度突变(注入水窜流段温度偏低,油层产出段温度偏高)。结合关井静温、开井流温对比测试,依托一维稳态热力学模型反演,可定量判定产水层位置、估算产液强度,实现温度异常与产水贡献的关联解析。

#### 1.1.2 分布式声波传感(DAS)原理

DAS技术基于相位敏感光时域反射原理<sup>[4-5]</sup>,利用光纤对外界振动、声波信号的高灵敏度响应特性:当井筒内流体流动、地层微震动作用于光纤时,会引发光纤折射率、长度微小变化,进而导致光纤内传输光信号相位偏移;通过检测相位变化幅度与频率,可解析井下流体流动状态、产液层位振动特征。

流体流速与声波能量呈对数线性关系。基于这一关系,可通过声波能量强弱反演流体流速大小,进而识别与区分产层与非产层。产出层位流体流动产生的声波信号显著强于非产层,且水相流动声波特征与油相存在明显差异。通过DAS分频处理(0~1 Hz、1~10 Hz核心频段),可区分开关井工况下流体流动信号,精准定位连续产水段与瞬时出水点,弥补DTS单一监测的多解性缺陷。光纤测井原理见图1。

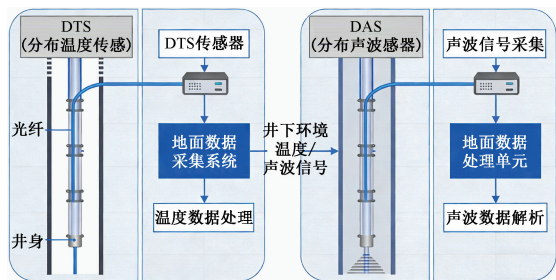


图1 光纤DTS与DAS测井原理图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber optic DTS and DAS logging principles

### 1.2 流动成像测井技术原理

阵列流动成像测井属于多相流截面扫描技术,针对短水平井油水两相分层流、泡状流等复杂流态设计,通过井下阵列传感器获取井筒截面全维度流

体参数,实现产液剖面可视化解析,核心依托阵列持水率监测与涡轮流量测速两大核心模块<sup>[6-8]</sup>。

该技术仪器配备多组电容/电阻探针、微型涡轮流量计,探针呈环形阵列分布覆盖全井眼,可实时测量井筒不同高度、不同方位的持水率;微型涡轮同步监测局部流体流速,通过插值算法重构井筒截面流场分布。基于不同流体介电常数、导电性差异,区分油相与水相,判定流型特征;结合持水率剖面与流速分布,量化各射孔段产水、产油贡献率,精准锁定主力产水层<sup>[9-10]</sup>。

针对短水平井大斜度、井眼偏心问题,流动成像仪配备自适应扶正臂,确保探针与井壁贴合,消除测量盲区;同时兼容爬行器输送工艺,可顺利下入水平段、大斜度段,解决常规测井仪器难以到位的难题,实现短水平井全井段流动参数精准采集。

### 1.3 井间示踪工艺技术原理

井间微量物质示踪技术属于油藏尺度监测手段,通过向注水井投放特异性微量示踪剂,追踪其在地层中的运移规律,判定注采连通关系、水驱推进方向与优势窜流通道,从油藏层面溯源短水平井来水方向,弥补井下测井仅能监测井筒信息的不足<sup>[11]</sup>。

#### 1.3.1 技术原理

井间微量物质示踪技术属于油藏尺度监测手段,选用稀土类微量物质示踪剂(如 Er、Ho),其具备本底浓度低、化学稳定性强、不被地层吸附、无毒无放射性且检测精度高达  $10^{-12} \sim 10^{-15} \text{ g/mL}$  等优势,完全适配低渗透油藏监测需求。示踪剂随注入水同步在地层中运移,通过高分辨率电感耦合等离子体质谱仪检测采出液中的示踪剂浓度,分析产出浓度曲线可确定突破时间、峰值浓度及持续产出时间,结合井距计算水线前缘推进速度;进而判定注采连通关系、水驱推进方向与优势窜流通道,从油藏层面精准溯源短水平井来水方向与水驱路径,弥补井下测井仅能监测井筒信息的不足。

#### 1.3.2 工艺原理

依据行业标准与地层水性、岩性特征,筛选本底值低、成本可控的示踪剂类型,按设计用量配液后通过正注方式注入注水井目的层。示踪剂投放后,按既定频率在周边采油井取样,经油水分离与前处理后,采用高分辨率电感耦合等离子体质谱仪进行浓度检测。通过数值拟合反演产出数据,定量计算注入水分配比例,识别高渗窜流通道,最终确

定注采井间动态连通关系,为精准定位短水平井来水方向与水驱路径提供工艺支撑。示踪剂注采工艺原理见图2。

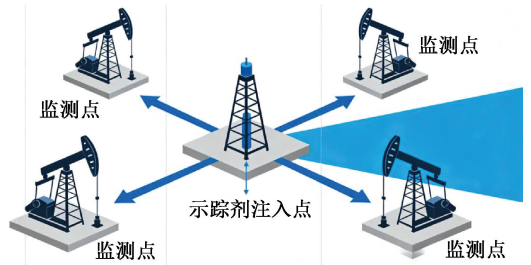


图2 示踪剂注入工艺示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tracer injection process

## 2 光电组合测井施工工艺

针对短水平井井眼轨迹复杂、常规测井施工难度大的技术难题,采用光电复合缆+爬行器输送的一体化施工工艺,实现了光纤测井与流动成像测井的同步作业。该工艺以专用光电复合缆为核心载体,兼具电力传输与光纤信号传输双重功能:电缆部分为爬行器和流动成像仪器提供稳定电力,保障井下仪器正常运转;光纤部分则承担 DTS 与 DAS 监测信号的实时上传,确保井下数据高效回传地面。井下仪器串采用“爬行器+流动成像仪+光纤传感器”组合设计,外径适配短水平井小井眼工况,耐高温耐压性能满足井下恶劣环境要求,爬行器可自主牵引仪器穿越大斜度段与水平段,克服仪器自重下入困难、通行能力不足的问题,有效解决常规测井仪器难以到位、监测存在盲区的工程难题,整体施工流程高效、安全、可控(见图3)。

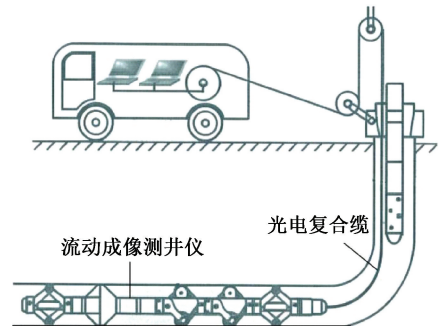


图3 光电组合测井施工工艺示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the construction process for photoelectric combined logging

## 3 应用实例

本次应用实例选取长庆油田新 X 区块典型井:新 1 井为光纤+流动成像找水实例,新 2 井为井间示

踪找水实例,全面验证技术组合应用效果。

### 3.1 新1井光纤+流动成像找水实例

#### 3.1.1 井基本情况

该井为短水平生产井,投产日期2025年6月16日,生产层位为长7、长8,钻遇油层2301.9 m,油层钻遇率99%。共计7个喷砂射孔点,分别为2341 m、2362 m、2378 m、2393 m、2420 m、2450 m、2478 m。投产初期含水率高达99%,产水层位不明,亟需精准找水。

经综合研判,最终采用光电组合测井工艺,同步实施分布式光纤(DTS+DAS)与阵列流动成像测井。阵列流动成像测井采用GE MAPS成像测井系统与Sondex PLT多参数测井仪组合,开展开井制度下的多参数数据采集,重点获取温度、压力、持水率、阵列电阻持率、全井眼流量等资料,精准识别主产层段及产出流体性质。分布式光纤测井分别监测关井、开井阶段的井筒温度与声波响应数据。基于不同测试阶段获取的井筒温度、声波响应数据、井口产量数据、流体PVT参数、压力数据等,结合单井地质资料开展该井光纤测井解释,并求取产出剖面分布情况。

#### 3.1.2 成果分析

新1井投产即高含水、产水段位置不明,大斜度

结构,常规测井难以准确入井与分层解释,因此采用光纤+流动成像组合测井实现井下产液剖面精准定位;新2井所在井组注采关系复杂、来水方向不清,因此采用井间示踪技术从油藏尺度溯源来水通道,两类实例分别对应井筒找水与油藏找水,形成互补验证。

(1)本次测试测得了开井制度下的温度、压力、伽马、持率和流量等曲线,曲线一致性较好,质量高。温度曲线显示,在开井制度下,各喷砂点处均出现明显的温度拐点,是明显的产出特征,尤其是2420 m处温度变化幅度最为明显。持水率变化在0.34~0.96之间,阵列持率RAT曲线与中心持率CWH曲线具有较好重复性和对应性,2450 m、2478 m处探头出现轻微油相,判定2450 m、2478 m处产出少量油。从涡轮流量曲线可以看出2450 m、2478 m处涡轮流体视速度从0快速上升到0.64 m/min。2420 m处视速度从0.64 m/min大幅上升到1.68 m/min。2341 m、2362 m处涡轮流体视速度从2.65 m/min显著上升到3.69 m/min,综合判断2420 m、2362 m、2341 m处为主产层段。根据流动成像综合分析,利用阵列持率RAT合成持水率曲线和涡轮视流体速度曲线,结合井口刻度总产液量,计算各喷砂点产量见表1。

表1 新1井流动成像解释成果表

Table 1 Interpretation results of flow imaging logging for well Xin1

段数	喷砂点位置/m	产水量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	产油量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	产液量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	产水贡献率/%	产液贡献率/%
7	2341	7.18	0.00	7.18	15.85	15.62
6	2362	10.33	0.00	10.33	22.81	22.49
5	2378	6.95	0.00	6.95	15.35	15.13
4	2393	5.71	0.00	5.71	12.62	12.43
3	2420	12.42	0.00	12.42	27.42	27.03
2	2450	2.03	0.51	2.54	4.48	5.52
1	2478	0.67	0.15	0.82	1.47	1.78
合计		45.29	0.66	45.95	100.00	100.00

(2)光纤测井采用开、关、开测试制度,DTS分别监测13.5 h、22 h、3h,DAS分别监测3 h、4h、2 h,通过对各制度下采集的数据分析,DTS、DAS在各工作制度下监测的温度与声波响应符合变化规律。DAS数据分析,该井在关井阶段,井筒较安静,声波能量较弱,瞬时开井阶段各段均见能量显示,但稳产后,开井阶段在2430 m以上有明显的流体流动响应特征,说明该处以上产出量较大,尤其是2420 m处是喷砂点,说明流体主要从此处产出;2478 m、2450 m喷砂点只在开井瞬间有声波能量,说明流体产出不连续,分析认为2420 m、

2362 m、2341 m喷砂点为主产层,2393 m、2378 m喷砂点为该井次产层段。DTS数据分析,流温在2420 m喷点以上明显高于静温,判断该段为主产层,流温在2478 m、2450 m喷点低于静温,说明此处产出冷液,判断是周围的注水井与此处存在连通,关井后周围的注入水停止供给,2478 m、2450 m喷点向地温恢复高温,且2478 m喷点流静温差较小,说明该段产出量较小,2450 m喷点产出量较大;流温在2378 m、2362 m、2341 m喷点拐点也较明显,说明也有产出。本次采用DTS与DAS数据融合解释方法:以DTS温度异常识别

潜在产液井段,确定产液层位置;再以 DAS 声波能量与分频特征验证流体流动活跃度,区分真实产层与温度干扰段;通过温度拐点与声波能量响应的深度匹配,实现双方法相互约束、相互印证,有效消除单一 DTS 监测因地层导热、井筒散热带来

的多解性,提高产层识别可靠性与解释精度。结合 DTS 和 DAS 综合分析,2 420 m、2 362 m、2 341 m 喷点为主产液段,2 450 m、2 393 m、2 378 m 喷点为次产层段,2 478 m 喷点略有产出,为微产。具体各层产量成果表见表 2。

表 2 新 1 井光纤解释成果表

Table 2 Interpretation results of fiber optic logging for well Xin1

段数	喷砂点位置/m	产水量/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	产油量/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	产液量/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	产水贡献率/%	产液贡献率/%
7	2 341	8.28	0.00	8.28	17.47	17.23
6	2 362	10.33	0.00	10.33	21.80	21.50
5	2 378	7.96	0.00	7.96	16.79	16.56
4	2 393	5.71	0.00	5.71	12.05	11.88
3	2 420	12.42	0.00	12.42	26.20	25.84
2	2 450	2.05	0.49	2.54	4.32	5.28
1	2 478	0.65	0.17	0.82	1.37	1.70
合计		47.40	0.66	48.06	100.00	100.00

流动成像与光纤测井解释结果存在小幅差异,主要源于监测原理、解释模型与测试制度不同;流动成像基于截面持水率与涡轮流量直接测量流体产出,光纤基于温度与声波能量间接反演产液强度。二者测试时序、采样方式、计算模型存在区别,但主力产液段(2 420 m、2 362 m、2 341 m)高度一致,实现了相互约束、相互印证,显著提高了综合解释的可靠性,避免单一技术多解性问题。

### 3.2 新 2 井井间示踪找水实例

针对井组注采关系不明、水窜方向不清的问题,在新 2 井投放 Ho 微量物质示踪剂,开展井间监测。

#### 3.2.1 井基本信息

该井组监测目的层位为长 8,共计 24 口井,实际取样 18 口井,所取井口产出液样品经过油水分离制样处理后,利用高分辨率电感耦合等离子体质谱仪进行检测,确定样品中有效示踪物质的浓度。为了能够对检测结果出现的异常情况进行核查,根据示踪剂的产出情况对存在疑问的数据点进行了样品复测或加密测样,共检测样品 957 样次,平均检测 41.61 样次/井。

#### 3.2.2 成果分析

根据化验结果显示,该井组示踪剂在 5 口采油井见剂,突破时间 6~22 d,示踪剂持续产出时间 8~14 d,峰值位置多位于波峰的中间部位,峰值浓度 0.60~107.35  $\mu\text{g}/\text{L}$ 。其中新 1 井第六天见剂,最高浓度 107.35  $\mu\text{g}/\text{L}$ ,见剂最早、峰值浓度最高,对应的水线推进速度为 41.51 m/d,明确该井为核心受益井与主要来水方向。通过示踪监测,清晰厘清井组注采连通关系,为注水调整、控水稳油提供了油藏尺度数

据支撑。新 1 井示踪剂产出浓度曲线图见图 4。

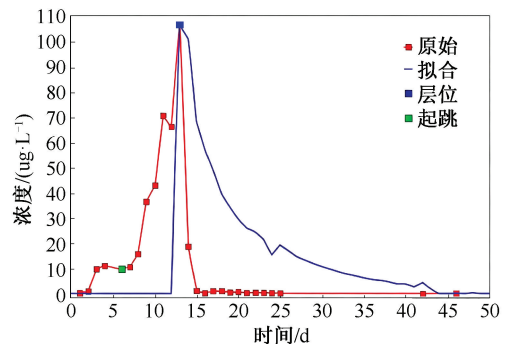


图 4 新 1 井井间示踪浓度曲线图

Fig. 4 Concentration curve of interwell tracer for well Xin1

基于示踪监测明确的来水方向与优势通道,结合新 1 井产液剖面监测结果,对新 1 井实施了第 4~7 段隔采控水措施。通过隔采后,目前日产液 12.24 t,产油 2.2 t,含水由 99% 下降至 82.02%。

## 4 结论

(1)“光纤 + 流动成像 + 井间示踪”一体化技术实现了短水平井“井筒产水段精准定位 + 油藏来水方向溯源”的全流程闭环分析。结合现场多井实测数据与措施效果验证,该技术可有效克服传统方法在复杂井眼条件下精度低、多解性强的缺陷,显著提升了找水结果的可靠性与针对性,为后续控水措施提供了可靠依据,具备在同类低渗透油藏推广应用的價值。

(2)光纤、流动成像与井间示踪多技术数据来源不同、解释维度各异,尚未形成统一的融合解释体系。建议构建多源数据协同解释模型,完善产水

层综合识别与水驱路径联合反演方法,进一步提升解释一致性与精准度。

(3)当前技术应用以监测与识别为主,尚未形成完整的闭环治理体系。建议在后续工作中,将本文建立的“井下定位-油藏溯源”一体化找水方法,与针对性治理措施(如本文实例中采用的卡堵水、隔采等分段控水工艺)相结合,构建“监测-识别-治理”一体化技术体系,实现找水与控水的闭环管理,支撑油井长期稳产上产。

**致谢:**感谢长庆油田分公司第一采油厂、第九采油厂及中油测井长庆分公司、地质研究院等相关单位的项目支持与资料协助。

#### 参考文献

[1] 张晶宇,周树勋,秦民君,等. 光纤测井技术在长庆油田的应用[C]//2023 油气田勘探与开发国际会议论文集. 武汉:中国地质大学(武汉),西安石油大学,陕西省石油学会,2023:876-885.

ZHANG Jingyu, ZHOU Shuxun, QIN Minjun, et al. Application of fiber optic logging technology in Changqing oilfield[C]//2023 International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), Xi'an University of Petroleum, Shaanxi Petroleum Society, 2023:876-885.

[2] 刘合,王松,叶泽禹,等. 光纤传感技术在油气田开发中的应用[J]. 石油物探,2024,63(4):707-717.

LIU He, WANG Song, YE Zeyu, et al. Application of fiber optic sensing technology in oil and gas field development [J]. *Petroleum Geophysics*, 2024, 63 (4): 707-717.

[3] 戴月祥,张伯新,伍永巴依,等. 水平井分布式光纤井温产液剖面测井技术及应用分析[C]//2021 油气田勘探与开发国际会议论文集(上册). 青岛:西安石油大学,中国石油大学(华东),陕西省石油学会,2021:269-277.

DAI Yuexiang, ZHANG Boxin, WU Yongbayer, et al. Distributed fiber optic well temperature production profile logging technology and application analysis for horizontal wells [C]//Proceedings of the 2021 International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development (Vol. 1). Qingdao:Xi'an Shiyou University, China University of Petroleum (East China), Shaanxi Petroleum Society, 2021:269-277.

[4] 张旭苹,张益昕,王亮,等. 分布式光纤传感技术研究和应用的现状及未来[J]. 光学学报,2024,44(1):11-73.

ZHANG Xuping, ZHANG Yixin, WANG Liang, et al. The current status and future of research and application of distributed fiber optic sensing technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44 (1): 11-73.

[5] 李大建,刘广胜,杜向前,等. 水平井套内分布式光纤产液剖面监测试验研究[J]. 石油机械,2023,51(9):101

-107.

LI Dajian, LIU Guangsheng, DU Xiangqian, et al. Experimental study on distributed fiber optic liquid production profile monitoring in horizontal well casing [J]. *Petroleum Machinery*, 2023, 51 (9): 101-107.

[6] 杨荣琦,刘军锋,黎明,等. 气水两相水平井阵列成像仪模拟实验及解释研究[J]. 地球物理学进展,2025,40(3):1163-1174.

YANG Rongqi, LIU Junfeng, LI Ming, et al. Simulation experiment and interpretation study of gas water two-phase horizontal well array imaging instrument [J]. *Advances in Geophysics*, 2025, 40 (3): 1163-1174.

[7] 陈猛,谢韦峰,张煜,等. 水平井油水两相流阵列电磁波持水率计算方法及应用[J]. 油气藏评价与开发,2023,13(4):505-512.

CHEN Meng, XIE Weifeng, ZHANG Yu, et al. Calculation method and application of electromagnetic wave water holding capacity for oil-water two-phase flow array in horizontal wells [J]. *Oil and Gas Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13 (4): 505-512.

[8] 李沁泽,刘军锋,高峰,等. 水平井油水两相流电容阵列持率算法研究[J]. 测井技术,2022,46(2):164-169.

LI Qinze, LIU Junfeng, GAO Feng, et al. Research on the algorithm of capacitance array holdup meter for oil-water two-phase flow in horizontal wells [J]. *Logging Technology*, 2022, 46 (2): 164-169.

[9] 田延妮. 水平井阵列电磁波持水率成像及计算方法研究[D]. 成都:西南石油大学,2020:1-56.

TIAN Yanni. Research on electromagnetic wave water retention imaging and calculation method of horizontal well array [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2020:1-56.

[10] 张晶宇,王卓,刘鹏鹏,等. 多参数产出剖面在水平评价井中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量,2021,41(19):19-20.

ZHANG Jingyu, WANG Zhuo, LIU Kunpeng, et al. Application of multi parameter output profile in horizontal evaluation wells [J]. *Chinese Petroleum and Chemical Standards and Quality*, 2021, 41 (19): 19-20.

[11] 张宏. 微量物质井间示踪剂在长庆油田的应用[D]. 东营:中国石油大学(华东),2017:5-23.

ZHANG Hong. Application of trace matter interwell tracers in Changqing oilfield [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2017:5-23.

编辑 方志慧

**第一作者简介:**张晶宇,男,1984年出生,硕士,高级工程师,2012年毕业于西南石油大学石油与天然气工程专业,现从事生产测井技术研究与管理工作。电话:15594988833, Email:zhangjingyu. cnlc@ cnpc. com. cn。通信地址:陕西省西安市泾河工业园方元大厦,邮政编码:710299。