

多元光学计算在电缆地层测试地层流体识别中的应用

张稼良¹, 张涛², 黄科¹, 盖龔秋³, 孙益⁴, 江有宏⁴

1. 中国石油集团测井有限公司地质研究院 陕西西安 710077
2. 中国石油集团测井有限公司测井技术研究院 陕西西安 710077
3. 中国石油集团测井有限公司评价信息部 陕西西安 710077
4. 中国石油集团测井有限公司制造公司 陕西西安 710077

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“油气田开发测井评价及透明油藏研究”(25ZYCJSG014)

引用: 张稼良, 张涛, 黄科, 等. 多元光学计算在电缆地层测试地层流体识别中的应用[J]. 油气井测试, 2026, 35(2): 17-23.

Cite: ZHANG Jialiang, ZHANG Tao, HUANG Ke, et al. Application of multivariate optical computing in formation fluid identification during wireline formation testing[J]. Well Testing, 2026, 35(2): 17-23.

摘要 在油基泥浆钻井环境及高含水层发育区域, 油基泥浆滤液与地层油的物理性质差异微弱, 电缆地层测试器传统依赖物理参数检测的流体识别技术面临识别精度低、抗干扰能力弱等制约电缆地层测试技术向精细化发展的关键难题。基于比尔-朗伯定律建立特定波长下光吸收强度与吸光物质浓度的定量关联, 将目标物质的回归向量编码为集成光学计算元件的透射函数, 使光学探测器直接输出目标物质浓度, 无需复杂数据反演, 建立了一种基于多元光学计算技术的井下流体识别新方法, 能够实现地层流体的定性与定量分析。新一代扩展油藏描述仪 RDxT 在华北油田评价井现场应用, 对 12 种目标组分的检测准确率均达到 95% 以上, 其中甲烷浓度测量误差 $\leq 1\%$, 远优于传统技术 $\pm 5\%$ 的误差范围。该方法为电缆地层测试井下流体识别提供了全新的技术路径与仪器设计思路, 具有重要的工程应用价值与推广前景。

关键词 多元光学计算; 光学计算元件; 电缆地层测试; 流体识别; 化学计量学; RDxT 仪器

中图分类号: TE271

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2026.02.003

Application of multivariate optical computing in formation fluid identification during wireline formation testing

ZHANG Jialiang¹, ZHANG Tao², HUANG Ke¹, GAI Yanqiu³, SUN Yi⁴, JIANG Youhong⁴

1. Geological Research Institute, China National Logging Corporation, Xi'an, Shaanxi 710077, China
2. Logging Technology Research Institute, China National Logging Corporation, Xi'an, Shaanxi 710077, China
3. R&D Center, China National Logging Corporation, Xi'an, Shaanxi 710077, China
4. Manufacture Company, China National Logging Corporation, Xi'an, Shaanxi 710077, China

Abstract: In oil-based mud drilling environments and regions with well-developed high-water-cut formations, the differences in physical properties between oil-based mud filtrate and formation oil are marginal. Consequently, traditional fluid identification technologies for wireline formation testers, which rely on physical parameter detection, face critical challenges such as low identification accuracy and weak anti-interference capabilities. These issues severely restrict the advancement of wireline formation testing technology toward high-precision characterization. To address this, a quantitative correlation between light absorption intensity at specific wavelengths and the concentration of light-absorbing substances was established based on the Beer-Lambert Law. By encoding the regression vector of the target substance into the transmission function of an integrated optical computing element, the optical detector can directly output the target substance concentration without requiring complex data inversion. This establishes a novel downhole fluid identification method based on multivariate optical computing technology, facilitating both qualitative and quantitative analysis of formation fluids. The new-generation Reservoir Description Extended Tool (RDxT) was applied in field operations at appraisal wells in the Huabei oilfield. Field applications demonstrate that the detection accuracy for 12 target components consistently exceeded 95%. Notably, the measurement error for methane concentration was $\leq 1\%$, which is significantly superior to the $\pm 5\%$ error margin of conventional technologies. This method offers a fundamentally new technical pathway and instrument design concept for downhole fluid identification in wireline formation testing, holding significant engineering

application value and broad prospects for promotion.

Keywords: multivariate optical computing; optical computing element; wireline formation testing; fluid identification; chemometrics; RDxT tool

电缆地层测试器的核心功能是通过直接获取地层流体样品及测量地层压力等地质参数,实现储层油气产能评价。历经近70年发展,地层流体取样技术已从最初只能获取高污染度样品,逐步演进为能够实现井下实时流体识别、获取低污染度原位样品的先进技术体系^[1]。该技术通过精准获取低污染度地层流体样品及实测地层压力、渗透率等核心地质参数,为储层油气产能评价、开发方案优化提供了不可或缺的基础数据^[2-3]。

当前,井下流体识别技术主要包括光学光谱分析技术、声学流体分析技术及核磁共振流体分析技术三大类。光学光谱分析技术通过测量流体的特征光谱响应实现组分识别,但受限于光谱重叠干扰,在复杂多组分体系中识别精度不足,声学流体分析技术依赖流体声学阻抗差异,对低密度流体的区分能力较弱,核磁共振流体分析技术基于流体氢核弛豫特性差异,但其检测结果易受地层孔隙结构、黏土含量等因素干扰。这些传统技术均以流体物理性质差异为识别基础,在常规水基泥浆环境、储层流体性质差异显著的场景下能够满足基本需求,但在油基泥浆钻井环境及高含水层发育区域,面临着严峻挑战^[4-5]。

光学光谱分析技术目前已成为电缆地层测试主流的井下地层流体识别方法,斯伦贝谢率先推出井下OFA光学流体分析模块,后续迭代LFA、CFA、IFA、ORA系列,持续拓展组分检测范围与定量精度;贝克休斯相继开发SampleView、IFX模块,形成多光谱融合检测体系。2024年中油测井与哈里伯顿联合制造推出了新一代扩展油藏描述仪(Reservoir Description Extended Tool, RDxT),是基于多元光学计算技术的电缆地层测试器。该仪器整合化学计量学与光学计算技术,构建新型集成光学传感计算平台。与传统测试技术依赖物理参数检测不同,其光学计算元件对化学成分具有高度敏感性,可通过化学成分差异有效区分油基泥浆滤液与地层油。RDxT配置12个针对不同组分的光学计算元件,能够精准检测特征组分的浓度,实现井下地层流体性质的实时分析^[6]。

本文详细阐述多元光学计算(Multivariate Optical Computing, MOC)技术的基本原理、RDxT仪器光

学流体识别模块(Integrated Characterization Section, ICS)的硬件结构与性能参数,并结合华北油田高XX评价井的现场应用数据,验证该技术的可靠性与优越性,为电缆地层测试井下流体识别技术的升级提供理论与工程支撑。

1 多元光学计算

多元光学计算的基础是多元光学分析技术,其核心是利用光与物质的相互作用规律,通过光学元件对光信号进行处理与解析,提取物质的特性信息^[7]。

1.1 技术原理

当光照射到物质表面时,会发生反射、折射、吸收等物理现象,物质的化学组成、分子结构等信息会通过光谱特征编码至光信号中。然而,实际地层流体(如原油)是包含数千种组分的复杂混合物,其光谱信息通常以高度重叠的形式呈现,导致离散信息的解析难度极大,传统光谱分析技术需通过复杂的数学反演算法才能实现组分浓度计算,不仅耗时较长(秒级),还易受噪声干扰。

在光学领域,比尔-朗伯定律建立了光对特定波长的吸收强度与吸光物质浓度的关联,其表达式如下

$$A(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \cdot L \cdot c \quad (1)$$

式中: $A(\lambda)$ 为特定波长的吸光度,无量纲; $\varepsilon(\lambda)$ 为特定波长的摩尔吸收系数(衰减率), $L \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$; L 是光的光程长度,cm; c 是光穿过的物质浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

光的吸光度与入射光及出射光强度的关系可表示为

$$A(\lambda) = -\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (2)$$

式中: I_0 为入射物质的光强度; I 为透射物质的光强度。

由于吸光度具有加和性,对于由多个组份 i ($i=1, 2, \dots, N$)组成的流体,每种组份都有特定衰减率 $\varepsilon_i(\lambda)$ 和浓度 c_i ,吸光度可表示为

$$A(\lambda) = \varepsilon_1(\lambda) \cdot l \cdot c_1 + \varepsilon_2(\lambda) \cdot l \cdot c_2 + \varepsilon_3(\lambda) \cdot l \cdot c_3 + \dots + \varepsilon_N(\lambda) \cdot l \cdot c_N \quad (3)$$

如果我们在 M 个波长 λ_j ($j=1, 2, \dots, M$)下测量吸光度,采用矩阵形式可表示为

$$\begin{bmatrix} A_{\lambda_1} \\ A_{\lambda_2} \\ \vdots \\ A_{\lambda_M} \end{bmatrix} = I \begin{bmatrix} \varepsilon_{1\lambda_1} & \varepsilon_{2\lambda_1} & \cdots & \varepsilon_{N\lambda_1} \\ \varepsilon_{1\lambda_2} & \varepsilon_{2\lambda_2} & \cdots & \varepsilon_{N\lambda_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \varepsilon_{1\lambda_M} & \varepsilon_{2\lambda_M} & \cdots & \varepsilon_{N\lambda_M} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: A 为测量的吸光度矩阵; $\varepsilon(\lambda)$ 为摩尔吸收系数矩阵; C 为物质组份的浓度矩阵。

目标是找到一组回归系数向量 R , 使得 $R \cdot A = C$ 。回归向量 R 可表达为

$$R = (I\varepsilon)^{-1} \quad (5)$$

回归向量 R 的解并非唯一, 需通过最小二乘法、主成分回归、偏最小二乘法及交替最小二乘法等优化算法获取最优解^[8-10]。回归向量 R 确定后, 通过样品光谱与回归向量的点积运算可实现浓度的经典回归计算

$$C = R \cdot I \quad (6)$$

式中: C 为浓度, R 为回归向量; I 为样品的光谱。

多元光学计算 MOC 是 Myrick 研究组^[11-12] 在 1998 年正式提出的, 它是光学信号处理 OSP (Optical signal processing) 方法的延伸, 其核心创新在于将回归向量设计为光学滤波器结构, 通过点积变换将化学计量分析直接集成于光学元件中, 无需额外的数据分析系统, 即可从光域卷积信号中快速提取特定组份的信息。

当光强度 $I_o(\lambda)$ 的光通过透射函数为 $T(\lambda)$ 的光学元件时, 从光学元件射出光的光强度可以通过点积计算

$$I(\lambda) = I_o(\lambda) \cdot T(\lambda) \quad (7)$$

该点积操作以光速进行, 通过标准探测器可量

化出射光强度。如果透射函数 $T(\lambda)$ 为回归向量 $R(\lambda)$, 则式(6)中的浓度 C 可通过多元光学计算直接获取

$$I(\lambda) = I_o(\lambda) \cdot T(\lambda) = I_o(\lambda) \cdot R(\lambda) = C \quad (8)$$

因此, 测量通过以回归向量为透射函数的光学元件的出射光强度, 可直接得到该物质中特定分析物的浓度。

Myrick 研究组采用气相沉积法制备多层薄膜固体光学元件, 将回归向量编码为光学元件的透射函数, 使光学探测器输出直接反映目标物质浓度的函数, 这类元件被定义为集成光学计算元件 (Integrated Computational Element Core, ICE Core)。ICE Core 的制备过程需严格控制薄膜的层数 (30~50 层)、厚度 (纳米级) 及材质组合, 确保透射函数与回归向量的匹配误差控制在 $\pm 2\%$ 以内。整个计算过程在光学系统中以光速自动完成, 无需人工主观解释与分析, 可实现目标物质浓度的实时检测。测量过程中光谱未被分解, 仅通过集成光学计算元件提取光域中的特定信息, 因此光学计算系统的集光率接近理论最大值, 相较于传统光谱仪具有更高的信噪比, 能够灵敏检测低浓度分析物。集成光学计算元件的带宽响应范围为 400~5 000 nm, 可覆盖紫外、可见光、近红外及红外光区域, 实现原油中不同烃类化合物的精准区分^[13]。

1.2 多元光学与传统光谱技术比较

相较于传统光学光谱分析技术, 多元光学分析技术在信息处理方式、检测性能、抗干扰能力、工程适用性、覆盖范围等方面具有显著优势, 具体对比见表 1。

表 1 多元光学分析技术与传统光学光谱分析技术对比

Table 1 Comparison of multivariate optical analysis technology vs conventional optical spectrometric analysis technology

对比指标	传统光学光谱分析技术	多元光学分析技术
信息处理方式	先分解光谱, 再通过复杂算法反演浓度	不分解光谱, 直接通过回归向量提取目标信息
检测速度	依赖数据反演, 耗时较长 (秒级)	点积运算以光速进行, 实时输出结果 (毫秒级)
信噪比	光谱分解过程中易引入噪声, 信噪比偏低	集光率接近理论最大值, 信噪比提升 30% 以上
低浓度检测能力	检测限较高 (通常 $\geq 10^{-4}$ mol/L)	检测限更低 (可达 10^{-6} mol/L), 灵敏性更强
抗干扰能力	易受光谱重叠、背景噪声干扰	回归向量特异性编码, 抗干扰能力突出
工程适用性	需配套复杂数据处理系统, 集成难度大	计算过程集成于光学元件, 便于井下仪器集成
组份覆盖范围	以常规烃类为主, 缺乏特殊组分检测	可扩展至合成钻井液、CO ₂ 等特殊组分

2 RDxT 仪器光学流体识别模块

中油测井与哈里伯顿联合制造的 RDxT 仪器, 除常规流体识别模块 (可测量地层流体密度、电阻率及电容) 外, 新增光学流体识别模块 (Integrated

Characterization Section, ICS)。该模块的核心是集成 12 个不同 ICE Core 的多元光学计算平台, 可实时检测对应组分的浓度 (包括 C1、C2、C3、C4+C5、饱和烃、芳香烃、树脂质、沥青质、气油比、水、二氧化碳、硫化氢)。12 个 ICE Core 光学计算元件安装于转盘

上,每 10 s 转动一圈,最多可扩展至 40 个 ICE Core 光学计算元件。ICE Core 元件已发展至 4 个版本,

组分检测范围与精度不断拓展,核心性能参数见表 2^[14]。

表 2 ICE Core 元件核心组分检测性能
Table 2 ICE Core detection performance for key components

组分	检测范围	检测精度
甲烷(C1)	0~100 mol%(气相/油相全量程覆盖)	绝对误差 $\leq\pm 1$ mol%;现场实验室比对平均偏差 ≤ 0.4 mol%
乙烷(C2)	0~100 mol%,适配凝析气、挥发油、黑油全流体类型	高浓度段绝对误差 $\leq\pm 1.5$ mol%;低浓度段(<5 mol%)绝对误差 $\leq\pm 0.5$ mol%
丙烷(C3)	0~100 mol%,适配凝析气、挥发油、黑油全流体类型	高浓度段绝对误差 $\leq\pm 1.5$ mol%;低浓度段(<5 mol%)绝对误差 $\leq\pm 0.5$ mol%
丁烷/戊烷(C4+C5)	气相:0~100 mol%;油相:0~20 wt%	油相绝对误差 $\leq\pm 1.0$ wt%;气相绝对误差 $\leq\pm 0.8$ mol%
饱和烃	0~100 wt%,覆盖轻质凝析油到重质原油全类型	单组分绝对误差 $\leq\pm 3$ wt%;四组分总量平衡误差 $\leq\pm 1$ wt%
芳香烃	0~100wt%,覆盖轻质凝析油到重质原油全类型	单组分绝对误差 $\leq\pm 3$ wt%;四组分总量平衡误差 $\leq\pm 1$ wt%
树脂质	0~100 wt%,覆盖轻质凝析油到重质原油全类型	单组分绝对误差 $\leq\pm 3$ wt%;四组分总量平衡误差 $\leq\pm 1$ wt%
沥青质	0~100 wt%,覆盖轻质凝析油到重质原油全类型	单组分绝对误差 $\leq\pm 3$ wt%;四组分总量平衡误差 $\leq\pm 1$ wt%
水(H ₂ O)	0~100 vol%,油基/水基泥浆环境全适用	绝对误差 $\leq\pm 2$ vol%;分辨率可达 0.1 vol%
气油比(GOR)	0~3 000 m ³ /m ³ ,覆盖干气到黑油全类型	相对误差 $\leq\pm 5\%$;实验室比对一致性 $\geq 97.5\%$
二氧化碳(CO ₂)	气相:0~100 mol%;油相/水相:0~30 wt%	0~16 wt% 油相环境绝对误差 $\leq\pm 0.43$ wt%;1.2~22 wt% 范围现场验证绝对误差 $\leq\pm 0.5$ wt%
硫化氢(H ₂ S)	常规量程 0~1 000 mg/L;抗硫版本可扩展至 0~10 000 mg/L	相对误差 $\leq\pm 10\%$;低浓度段绝对误差 $\leq\pm 15$ mg/L

如图 1 所示,点光源光谱响应范围为 400~5 000 nm,覆盖紫外、可见光、近红外及中红外区域,可满足不同组分的光谱吸收需求。点光源发出的光照射到流体池,与从 RDxT 工具泵入的地层流体发生相互作用。光线携带流体组分信息通过转盘上的 ICE Core 传感器与滤光片组,最终传输至高灵敏度光学探测器,探测器测量到的信号是与通过

ICE Core 的光强成正比的电压信号。通过刻度文件计算校准,可以把电压信号转换为目标物质的浓度。20 个滤光片与 ICE Core 元件协同工作,其中 12 个针对核心组分检测的 ICE Core 元件安装于电动转盘上,转盘每 10 s 转动一圈,实现对 12 种组分的循环检测,剩余 8 个滤光片用于信号校准与背景扣除。

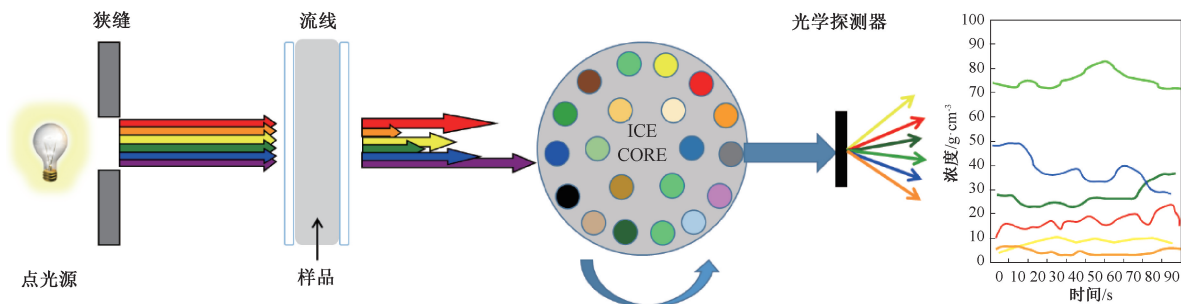


图 1 ICS 模块多元光学计算平台示意图

Fig. 1 Schematic of ics module multivariate optical computing platform

为验证井下条件下 ICE Core 多元光学计算平台的性能,哈里伯顿公司以甲烷 ICE Core 传感器为对象开展现场试验。选择甲烷作为验证对象的原因在于甲烷是井下流体实时测量的关键参数,也是各类地层流体中普遍存在的分析物。

ICE Core 测量的甲烷浓度随时间变化曲线如图 2 所示^[15],图中同时显示同期 RDT 测量的流体密度。图中灰色曲线为 ICE Core 甲烷浓度实时曲线,黑色曲线为 ICE Core 甲烷浓度 3 min 平均曲线。由图 2 可见,ICE Core 甲烷实时曲线存在高频振荡,

初期振荡强度较大,20 min 内逐渐减弱,且振荡频率与流体密度信号中可观测的泵抽频率同步,同期平均甲烷浓度从 0.15 g/cm^3 逐渐上升至 0.236 g/cm^3 。

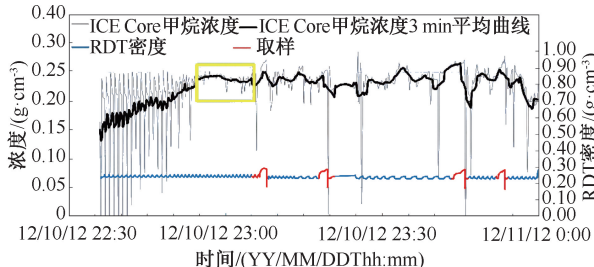


图2 ICE Core 甲烷浓度随时间变化图

Fig. 2 ICE Core methane concentration vs. time

实时曲线的高频波动与平均曲线的小幅上升,是流线中混合流体清理的典型特征;幅度逐渐减小的向下尖峰,可能是随泵抽体积增加而被清理的泥饼颗粒。黄色高亮区域自尖峰最小值处开始,显示平均甲烷浓度为 $0.236 \text{ g/cm}^3 \pm 0.003 \text{ g/cm}^3$,尽管实时数据存在偶发尖峰,但3 min 平均曲线稳定性良好,与储层温度压力条件下纯甲烷理论值 (0.232 g/cm^3) 高度吻合。结合 RDT 密度计测量的流体密度 (0.239 g/cm^3),可判定 ICE Core 测量样品为含甲烷 $97\% \pm 1\%$ 的干气。独立 PVT 实验室分析结果显示,所有样品的平均甲烷浓度为 $96.600\% \pm 0.03\%$,与 ICE Core 测量结果一致性显著。

3 应用实例

2024 年,RDxT 仪器在华北油田高 XX 评价井开展现场应用试验。该井位于华北油田某凹陷带,目的层为东营组三段,主要含油层系为河流相砂岩储层,储层埋深 $1670 \sim 1790 \text{ m}$,具有孔隙度高 ($25\% \sim 28\%$)、渗透率中等 ($50 \sim 100 \text{ mD}$)、非均质性较强的特点。由于该区域采用油基泥浆钻井,传统测井技术难以有效区分油基泥浆滤液与地层油,给储层流体性质判定带来较大困难。本次试验连续作业 45 h ,共测量 21 个深度点的地层压力,对 1785 、 1835 、 1917.5 m 三个目的层位开展井下光谱流体性质分析,累计抽出地层流体 167 L ,获取 3 L 原位地层流体样品。试验过程中,ICS 模块全程稳定运行,未出现因高温高压导致的信号中断或精度漂移,验证了其井下适应性。根据地层测试压力数据绘制的压力梯度剖面图 3 所示。

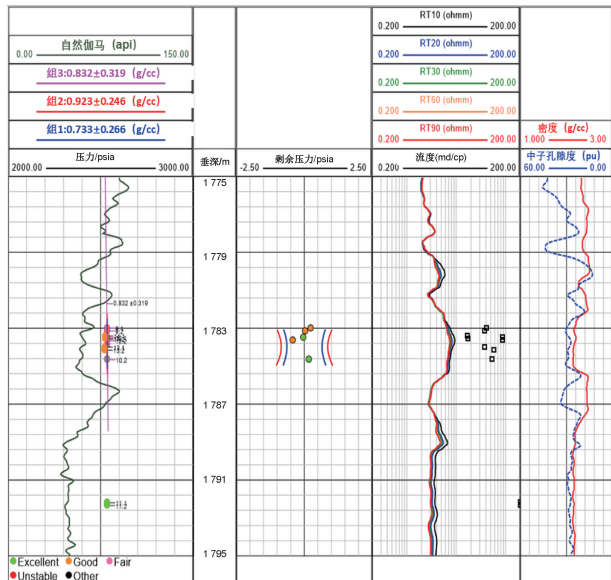


图3 高 XX 井压力梯度剖面图

Fig. 3 Pressure gradient profile of the Gao XX well

ICS 模块、密度模块及电容模块的测量结果如下:

(1) 测深 1785 m (垂深 1672.54 m): ICS 模块检测显示,前 176 min (共计 19 L) 泵抽流体水组分占比超过 99% ,烃类组分浓度低于 1% ,此阶段主要是排除污染带泥浆滤液。第 176 min 后地层油开始突破进入仪器,井下原位流体密度为 $0.862 \sim 0.964 \text{ g/cm}^3$,电容为 $19.6 \sim 49.9 \text{ pF}$ 。ICS 模块受到地层流体中高吸光度物质影响,出射光强度过低,无法进行流体组分分析,仅在第 246 min 和第 375 min 出现短暂的油气信号,结合压力梯度特征综合判定该层为油水同层(见图 4)。

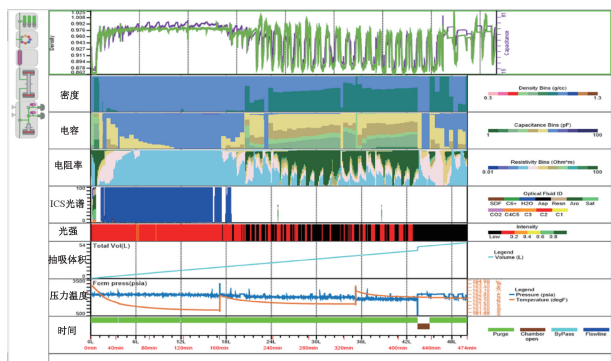


图4 高 XX 井流体识别综合图

Fig. 4 Integrated fluid identification plot of the Gao XX well

(2) 测深 1835 m (垂深 1714.52 m): 抽出地层流体体积 162 L ,井下原位流体密度为 0.979 g/cm^3 ,电容为 79.4 pF ,ICS 模块检测显示水组分占比超过 99% ,烃类组分浓度低于 1% ,结合压力梯度特征综

合判定该层为水层(见图5)。

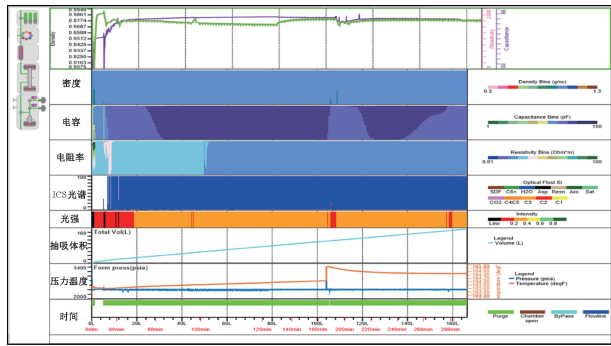


图5 高XX井流体识别综合图

Fig. 5 Integrated fluid identification plot of the Gao XX well

(3)测深1 917.5 m(垂深1 783.57 m):抽出地层流体体积40 L,井下原位流体密度为0.865~0.966 g/cm³,电容为19.4~45.5 pF,ICS模块检测显示油组分(饱和烃+芳香烃)浓度占比为45%~55%,水组分占比为45%~55%,结合压力梯度特征综合判定该层为油水同层(见图6)。

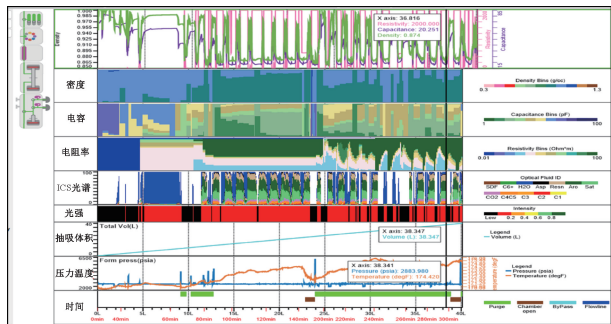


图6 高XX井流体识别综合图

Fig. 6 Integrated fluid identification plot of the Gao XX well

裸眼井解释结果显示,23号层位于东营组三段中部,岩性偏细,物性较好(孔隙度27.4%),储层内均质性良好,电阻率7.0 Ω·m,临近24号水层电阻率3.0 Ω·m,综合解释为油层。为进一步确认23号地层流体性质,在1 917.5 m进行光学流体识别测试,共泵抽40 L地层流体。ICS模块检测显示,前76 min泵抽流体为水(共计25 L),此阶段主要是排除管线内的预置保护液与污染带泥浆滤液。76 min后地层油开始突破进入仪器,ICS光谱显示油组分以饱和烃和芳香烃为主,且油与水呈间隔出现特征。该现象的成因在于:泵抽模块位于ICS模块下方,受油水重力差异影响,其往复泵中出现分相,油相因密度较小聚集于上部,水相位于下部,导致ICS流线中呈现一段油一段水的交替状态。在泵抽150 min与350 min时取样,获得2 L地层流体,样

品装入取样瓶起出井口后,现场倒样后观测显示为油水混合物,直接验证了ICS光谱对该地层“油水同层”判定的准确性。

本次应用中,ICS模块对12种目标组分的检测准确率均达到95%以上,其中甲烷浓度测量误差≤1%,远优于传统技术±5%的误差范围。与传统流体分析技术相比,RDxT仪器的识别结果更贴合实际地层情况,有效避免了因油基泥浆滤液、钻井液干扰导致的误判,为该井的储层评价与开发方案制定提供了可靠依据^[16]。

4 结论

(1)MOC多元光学计算技术通过将回归向量编码为光学元件的透射函数,实现了地层流体组分浓度的实时精准检测,现场应用中12种目标组分检测准确率超95%,甲烷浓度测量误差≤1%,其基于化学成分差异的识别机制,突破了传统技术依赖物理性质参数的局限,有效解决了不同泥浆环境下的流体识别难题,为井下流体识别提供了全新技术路径。

(2)采用MOC技术的RDxT新一代电缆地层测试仪器,相较于传统光学光谱分析法,检测速度达毫秒级,信噪比提升30%以上,可实时分析地层流体不同化学组分的浓度。其计算过程在光学系统中以光速自动完成,无需人工主观解释与复杂数据反演,单深度点资料解释效率提升90%以上。

(3)ICE Core光学计算元件的设计与迭代是多元光学计算技术的核心,未来可通过遗传算法优化、人工智能建模等方法,开发更多组分的ICE Core元件,改进抗干扰算法与制备工艺,进一步提升技术的检测性能与适应能力,拓展其在电缆地层测试、随钻测井等领域的应用场景,为油田精细勘探开发提供更有力的技术支撑。

致谢:感谢中油测井公司同意本文公开发表;感谢哈里伯顿在论文素材、方法研究方面做出的贡献。

参考文献

- [1] 杨兴琴,王书南,周子皓. 地层测试与井下流体取样分析技术进展[J]. 测井技术,2012,36(6):551-558.
YANG Xingqin, WANG Shunan, ZHOU Zihao. Progresses in formation testing and subsurface fluid sampling & analysis technology[J]. Well Logging Technology, 2012, 36(6): 551-558.
- [2] DEGRANGE J, GRIFFITHS R. Formation Evaluation- While-Drilling technology improves data delivery [J].

- Journal of Petroleum Technology, 2013, 65(7): 36-38.
- [3] 冯永仁, 左有祥, 王健, 等. 地层测试技术及其应用的进展与挑战[J]. 测井技术, 2019, 43(3): 217-227.
FENG Yongren, ZUO Youxiang, WANG Jian, et al. Advances and challenges in formation test and practical application[J]. Well Logging Technology, 2019, 43(3): 217-227.
- [4] 谢献辉, 陈鸣, 孙殿强, 等. 油基钻井液对电缆地层测试样品污染影响的定量分析[J]. 录井工程, 2025, 36(2): 42-49.
XIE Xianhui, CHEN Ming, SUN Dianqiang, et al. Quantitative analysis of the contamination effects of oil-based drilling fluids on wireline formation test samples[J]. Mud Logging Engineering, 2025, 36(2): 42-49.
- [5] 穆贵鹏, 张国强, 涂春赵, 等. 电缆地层流体取样技术的改进及其在渤海油田的应用[J]. 石油工业技术监督, 2021, 37(9): 58-61.
MU Guipeng, ZHANG Guoqiang, TU Chunzhao, et al. Improvement of formation fluid sampling technique with wireline and its application in Bohai oilfield [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2021, 37(9): 58-61.
- [6] 邹慧田, 朴明旭, 张贤, 等. 可见光波段计算单层衍射光学元件设计[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(8): 330-341.
ZOU Huitian, PIAO Mingxu, ZHANG Xian, et al. Design of computational single-layer diffractive opticelement in visible waveband [J]. Infrared and Laser Engineering, 2025, 54(8): 330-341.
- [7] 段潮舒, 蔡文生, 邵学广. 多元光学计算与下一代光谱仪[J]. 分析化学, 2021, 49(4): 593-601.
DUAN Chaoshu, CAI Wensheng, SHAO Xueguang. Multivariate optical computing and next-generation spectrometer[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2021, 49(4): 593-601.
- [8] BOYSWORTH K M, BANERJI S, WILSON M D, et al. Generalization of multivariate optical computations as a method for improving the speed and precision of spectroscopic analyses[J]. Journal of Chemometrics, 2008, 22: 355-365.
- [9] BIN D, AARON U, CRAIG C D, et al. Molecular factor computing for predictive spectroscopy[J]. Pharmaceutical Research, 2007, 24(8): 1441-1449.
- [10] FADONOUGBO J, PARK K, NA T, et al. An integrated computational and experimental method for predicting hydrogen plateau pressures of TiFe_{1-x}M_x-based room temperature hydrides [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(40): 17673-17682.
- [11] HAIBACH F G, GREER A E, SCHIZA M V, et al. On-line reoptimization of filter designs for multivariate optical elements [J]. Applied Optics, 2003, 42(10): 1833-1838.
- [12] MYRICK M, SOYEMI O, KARUNAMUNI J, et al. A single-element all-optical approach to chemometric prediction[J]. Vibrational Spectroscopy, 2002, 28(1): 73-81.
- [13] 邱非同. 多变量光学计算气体监测相关光谱技术[D]. 苏州: 苏州大学, 2023: 25-45.
QIU Feitong. Research on spectrum technology related to variable optical computing gas monitoring [D]. Suzhou: Soochow University, 2023. : 25-45.
- [14] ERIKSEN K, JONES C, FREESE R, et al. Field tests of a new optical sensor based on integrated computational elements for downhole fluid analysis [R]. SPE 166415, 2013.
- [15] JONES C, DAI B, PRICE J, et al. A new multivariate optical computing microelement and miniature sensor for spectroscopic chemical sensing in harsh environments: design, fabrication, and testing [J]. Sensors, 2019, 19(3): 701.
- [16] KRISTENSEN M, CHUGUNOV N, GISOLF A, et al. Real-time formation evaluation and contamination prediction through inversion of downhole fluid-sampling measurements [R]. SPE 187432, 2019.

编辑 程莹

第一作者简介:张稼良,男,1992年出生,工程师,硕士,2015年毕业于中国石油大学(北京)勘查技术与工程专业,现主要从事油藏动态监测方法、资料解释方法研究及应用工作,电话:029-88652836,Email:zhangjlsccj@cnpc.com.cn。通信地址:陕西省西安市高新技术开发区锦业二路丈八五路50号中国石油集团测井有限公司,邮政编码:710077。