

# Application of Combined Production Logging Technology in Horizontal Wells

Jiling Li<sup>1</sup>, Peng Niu<sup>2</sup>, Huanying Ma<sup>1</sup>, Jijiu Zhang<sup>2</sup>, Lizhu Jia<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Well Tech, China Oilfield Services Ltd. COSL, Sanhe Hebei

<sup>2</sup>Tanggu Operating Company of Well Tech, China Oilfield Services Ltd. COSL, Tianjin

Email: lij17@cosl.com.cn

Received: Feb. 13<sup>th</sup>, 2017; accepted: Mar. 20<sup>th</sup>, 2017; published: Jun. 15<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

The horizontal wells play a significance role in increasing yield with continuous deepening of oil and gas development in offshore oilfields. However, it faced the problems such as water production and continuous increase of water cut etc. In order to stabilize yield and hold water cut, it was a key measure for water control, stabilizing production and tapping the potential at the late stage by conducting production logging in horizontal section and determining the production and reservoir drainage of each layer. The horizontal section, which was parallel to the reservoir, had an obvious gravity differentiation, upslope and downslope flow coexist at the same cross-section; these cases make the traditional centralized velocity survey unsuitable. At the same time, the horizontal section usually ran through one single layer, and there was no standard water-bear layer for calibration, which constrained the monitor of distribution of residual oil saturation. To solve these problems, this paper intends to propose a new combined logging method, which is the makeup of multi-phase array tools (MAPS) and reservoir performance monitor tools (RPM). By obtaining and corroborating the velocity profile in horizontal section, the oil-water distribution and residual oil saturation distribution, a comprehensive interpretation solution is achieved a good effect is obtained.

## Keywords

Horizontal Well, Production Logging Technology, Multi-Phase Array Tools (MAPS), Reservoir Performance Monitor Tools (RPM), Residual Oil Saturation

---

# 生产测井组合技术在水平井中的应用

李疾翎<sup>1</sup>, 牛朋<sup>2</sup>, 马焕英<sup>1</sup>, 张际久<sup>2</sup>, 贾立柱<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中海油田服务股份有限公司油田技术事业部, 河北 三河

<sup>2</sup>中海油田服务股份有限公司油田技术事业部塘沽作业公司, 天津

作者简介: 李疾翎(1980-), 女, 高级工程师, 现主要从事生产测井解释与油气田开发地质方面的科研工作。

Email: lij17@cosl.com.cn

收稿日期: 2017年2月13日; 录用日期: 2017年3月20日; 发布日期: 2017年6月15日

## 摘要

随着海上油气田开发的不断深化, 水平井技术已在增储上产中起到了巨大作用, 但也面临着出水及含水不断升高的问题。进行水平段储层生产测井, 确定井下层内生产情况及储层动用情况, 是后期控水稳产、措施挖潜的关键。水平井因井眼轨迹与储层平行、流体重力分异明显、上/下坡流共存等因素, 常规居中测量中心流速的测井技术已不适用; 同时, 水平井为单层开采, 剩余油饱和度分布无标准水层刻度, 为生产层剩余油分布监测提出了挑战。提出了阵列式多相流测井仪组合(MAPS)和剩余油饱和度测井技术(RPM)的组合测井方式, 通过水平段截面速度剖面、流体性质分布以及剩余油饱和度分布三者间的相互验证、综合解释的解决方案, 取得了良好效果。

## 关键词

水平井, 生产测井技术, 阵列式多相流测井仪组合(MAPS), 剩余油饱和度测井技术(RPM), 剩余油饱和度

Copyright © 2017 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

水平井钻探是油气田开发、提高采收率的一项重要技术, 水平井技术在海上油气田开发中的应用日益广泛, 仅中海油某油田已有在产水平井 360 余口, 在增储上产中起到了巨大作用。然而, 由于水平井的开采方式特殊, 见水后含水率上升速度快, 致使目前该油田在产水平井平均含水率已上升至 47.0%, 见水突进井的含水变化率高达 6.1%/月, 并已有 14 口水平井因含水过高处于关停状态, 占到总井数的 3.8%, 出水形势严峻, 迫切需要获得水平井层内产出剖面及储层动用情况, 为后期控水稳产、措施挖潜提供指导。

## 2. 水平井生产测井技术

### 2.1. 产出剖面测井技术

水平井中水平段流体分异彻底, 重质相位于井眼底部, 轻质相位于井筒顶部, 井下流动状态复杂,

常规的持率及密度仪器不能精确反映井筒流态的真实情况,同时居中涡轮仅能获得井筒中心流速,不能精确描述截面中已分异的不同性质流体的速度分布,解释精度降低[1][2][3][4]。

阵列式多相流测井仪组合(MAPS)是新一代生产测井工具,专门针对大斜度井、水平井研制,对井下流动通道内的重力分异及截面流体分布识别有明显优势,仪器组合由阵列式涡轮流量计(SAT)、电容式阵列持水率仪(CAT)和电阻式阵列持水率仪(RAT)构成,仪器串组合如图1所示。

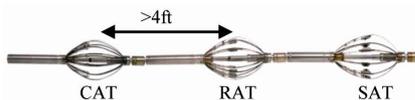


Figure 1. MAPS tool string  
图 1. MAPS 仪器串组合图

1) 阵列式涡轮流量计 由6个小涡轮分布于6个支撑臂内侧,以获取井眼截面不同位置的速度分布。最新采用钛合金材料,三维打印的涡轮其启动速度更低,以适应低流量水平井的需求。

2) 电容式阵列持水率仪 由12个阵列式微型探头分别分布于12个支撑臂内侧,测量流体电容;居中测量;适用于3~7 in内径的套管或者筛管。测量原理是,利用油气水不同的介电常数(气1、水80、油5),来识别流体性质,当探头周围流体的介电常数发生改变时,探头传感器输出的频率随之发生改变,通过各探头的刻度校准就可使探头能够识别周围流体性质。

3) 电阻式阵列持水率仪 由12个阵列式微型探头分别分布于12个支撑臂内侧,测量流体电阻;居中测量,适用于3~7 in内径的套管或者筛管。测量原理是,利用不同流体导电性存在差异区分流体性质。水具有高导电性,烃具有非常低的导电性,当探头周围的电阻发生改变时,意味着流体性质发生改变,因此可以通过测量管中不同位置的电阻,获得管中水/烃的分布关系。

## 2.2. 剩余油饱和度测井技术

多数水平井受限于井斜影响,裸眼测井资料不全,而要进行剩余饱和度的求取,必须有裸眼井含水饱和度、孔隙度和泥质含量等数据,故在剩余油饱和度测井解释前,必须先进行裸眼井储层参数的还原[5]。

RPM测井技术是目前成熟的剩余油饱和度测井技术,具有碳氧比能谱测井模式(RPM-C/O)和中子寿命测井模式(RPM-PNC)等多种测量模式,可通过邻井测井资料分析,结合录取的RPM-PNC数据进行地层参数的求取[6][7]。

1) RPM-C/O: 是以碳和氧元素为地层中油和水的指示元素,利用碳和氧元素与快中子发生非弹性散射,所释放出伽马射线的能量和计数率的差别来确定剩余油饱和度的测井方法。

2) RPM-PNC: 是测量快中子与地层相互作用后,被地层俘获衰减(中子寿命)伽马计数率来评价储层,通过对孔隙度指示曲线(RPOR曲线)进行校正,可获得中子孔隙度。

## 3. 水平井下井工艺

水平井测井时,测井仪器组合无法通过自重到达目的层位,与常规直井、小斜度斜井下井工艺存在较大差异,需通过辅助的特殊下井工艺将测井仪器组合下入目的层位。目前,常用的水平井下井工艺有连续油管输送、水力泵送和爬行器输送等,下井工艺各有其优缺点。

1) 连续油管输送 为陆地油田较为常见的水平井下井工艺,操作简单;但连续油管输送设备体积大,对井场空间要求较高,海上生产平台井场空间受限,该下井工艺不具有普遍性。

2) 水力泵送 常用于井下管柱变径小、变径位置较少的大斜度井或水平井,只需在井口加大注入量

或额外增加一泵送接头即可达到输送仪器的效果，为注水井的首选下井工艺。缺点在于每次泵送仪器后需长时间等待稳定再进行测井；产出井测井选用水力泵送会在一定程度上对正常生产状态产生干扰，也存在储层污染的风险，并且等待稳定时间更长，在产出井应用受限。

3) 爬行器输送 为目前较为先进的水平井下井工艺，具有适用管柱范围广、推/拉力强、测前模拟精确、遇阻/卡后可操作性强、可直接与测井仪器进行任意位置衔接等优点，为目前水平井下井工艺首选。爬行器及爬行齿轮如图 2 所示。



Figure 2. The tractor and tract gear  
图 2. 爬行器及爬行齿轮

#### 4. 应用实例

A 井是海上油田的一口水平产出井，最大井斜 91.8°，为 Y 管电泵合采管柱，水平段长约 300.0 m，为裸眼优质筛管完井。2009 年投产，投产即见水，目前井口产液 64.0 m<sup>3</sup>/d、含水率 96.8%。由于该井存在投产初期未达到设计产能、高含水、生产压差大、地层供液不足等问题，与地质油藏认识不符。因此，需要通过生产测井明确水平段产出状况及含水率，明确水平段剩余油分布状况及水淹规律。

##### 4.1. 作业施工概况

水平井因井眼轨迹穿越于生产层中，水由地层产出后进入地层与筛管之间的环空，通过筛管进入井筒，井筒出水与地层出水位置可能存在差异。通过综合分析，决定选用 MAPS 和 RPM 的组合测井技术，分别对井筒内流动剖面及近井地带地层参数进行评价，并选择爬行器作为输送的下井工艺。

##### 4.2. 资料处理解释

采用动静态相结合的方法，对 MAPS 和 RPM 测井资料进行处理解释，分别针对井筒出水和地层出水进行分析，再将两者解释成果相结合进行综合解释。图 3 为综合测井解释流程图。

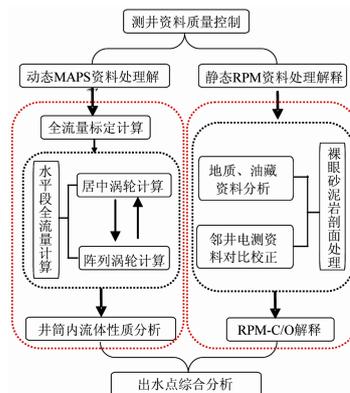
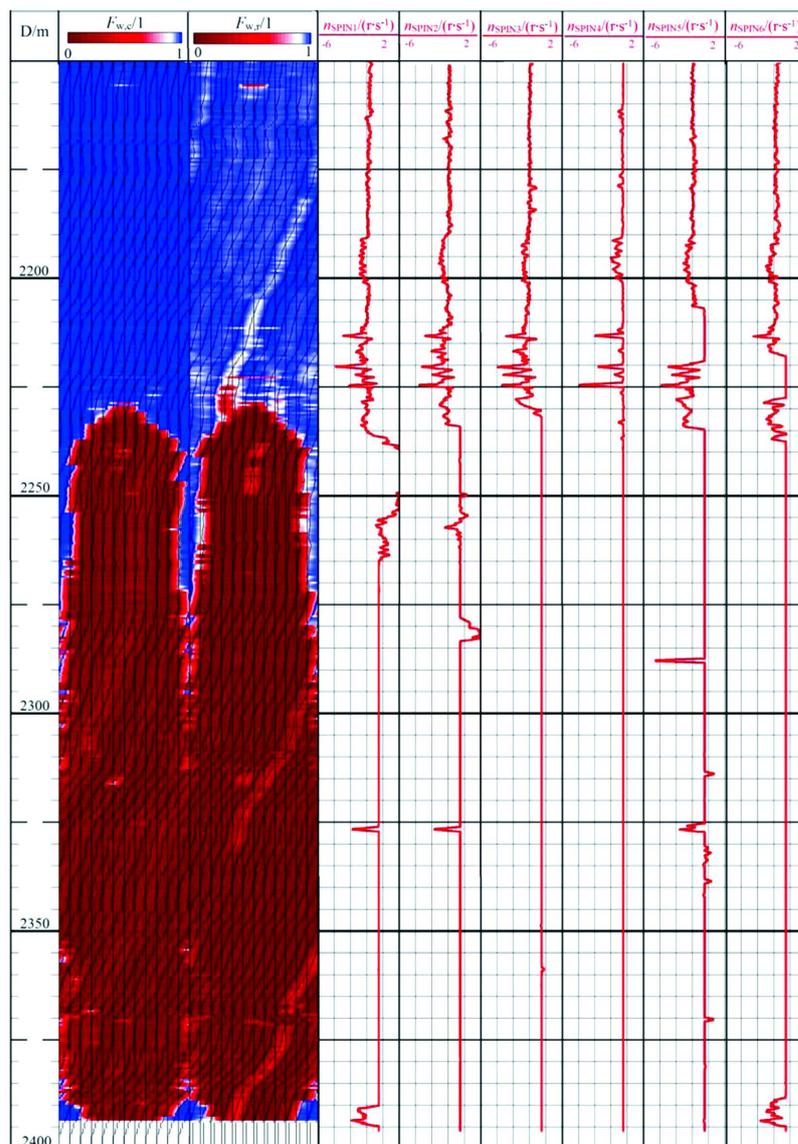


Figure 3. The process diagram of integrated logging interpretation  
图 3. 综合测井解释流程图

### 4.2.1. MAPS 资料分析

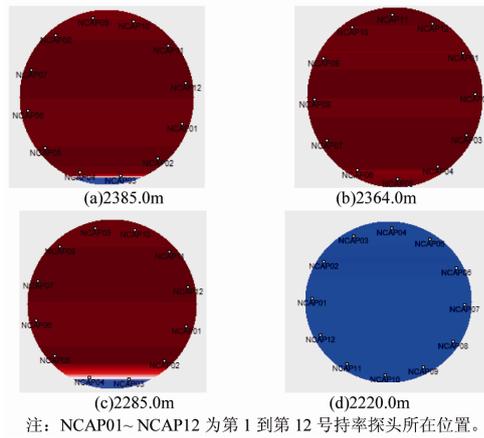
SAT 因未全井段启动, 无法对测试段内进行详细分层解释, 但可通过 CAT 与 RAT 对井筒内流体性质的细致刻画分析出井筒内出水点。从图 4 中可以看出, 由下往上, 2382.0 m 以下井筒低边分布少量水, 井筒高边充满油气, 说明 2382.0 m 以下存在出水点, 但出水量较少; 继续往上至 2327.0 m 之间, 可以看出整个井筒全部被油气充填, 无出水迹象, 该段不出水; 自 2327.0 m 向上, 井筒低边开始逐渐出现水的累积, 至 2275.0 m 处井筒低边水量趋于稳定, 说明 2327.0~2275.0 m 井段存在点状出水点, 出水量不大; 继续向上至 2240.0 m 处, 井筒低边水量继续累积, 经过 2230.0 m 后全井筒全部充填为水, 说明 2230.0~2240.0 m 井段为 A 井主要出水点。图 5 分别为由水平段趾部至根部不同位置典型流体性质截面分布。



注:  $D$  为井深;  $F_{w,c}$  为电容含水率;  $F_{w,f}$  为电阻含水率;  $n_{SPIN1}$ 、 $n_{SPIN2}$ 、 $n_{SPIN3}$ 、 $n_{SPIN4}$ 、 $n_{SPIN5}$ 、 $n_{SPIN6}$  分别为 1~6 号涡轮转速; 其中涡轮转速的数值范围“-6~2”中负值代表涡轮反转, 正值代表涡轮正转。

Figure 4. The diagram MAPS logging combination

图 4. MAPS 测井组合图

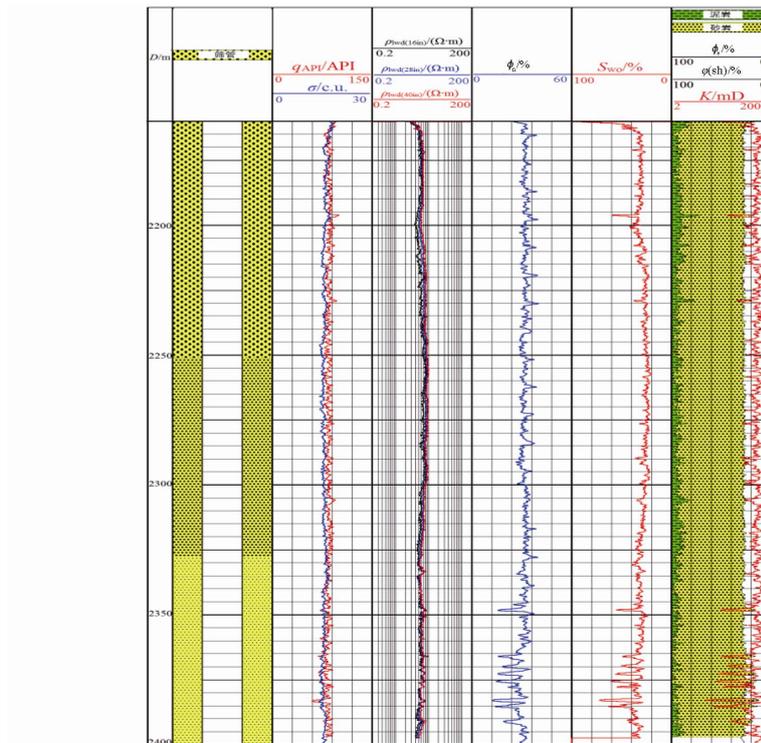


注：NCAP01~NCAP12 为第 1 到第 12 号持率探头所在位置。

**Figure 5.** The distribution of fluid properties in cross section from toe to root parts of horizontal segment  
**图 5.** 水平段趾部至根部不同位置横截面流体性质分布图

#### 4.2.2. RPM 资料分析

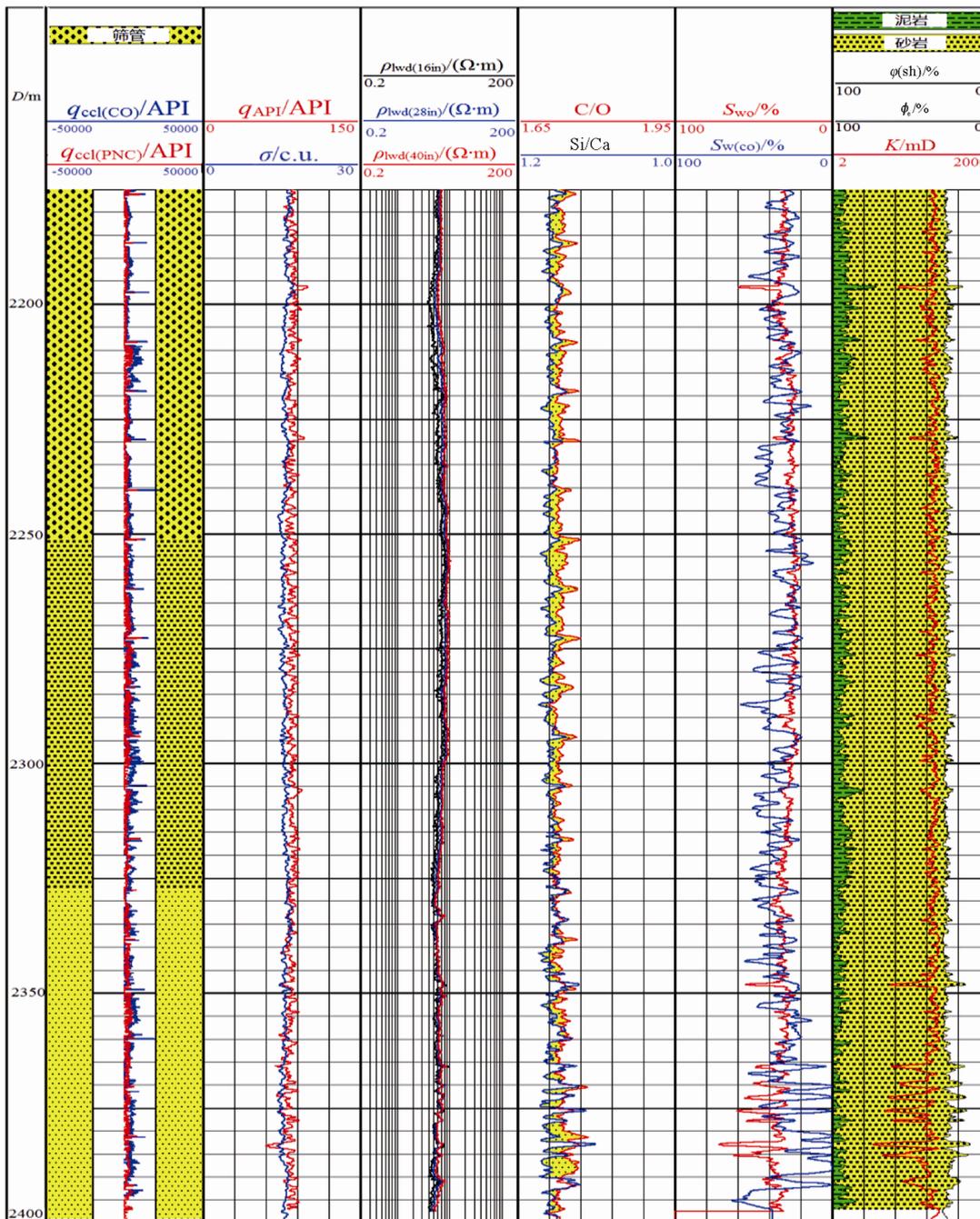
由于 A 井原始裸眼测井资料不全，在 RPM-C/O 测井解释前，需先利用校正后的 RPM-PNC 模式测量的孔隙度指示曲线结合裸眼自然伽马、电阻率等数据，对储层原始饱和度、孔隙度及渗透率进行计算。计算出的裸眼井岩性剖面见图 6。从图 6 可见，在原始状态下，水平段属于高孔、高渗且含油饱和度较高的储层；除 2365.0 m 以下由于含砾导致物性稍差外，其余井段渗透率都在 500.0~900.0 mD 之间，孔隙度为 30.0% 左右。



注： $q_{API}/API$  为自然伽马； $\sigma$  为宏观俘获界面； $\rho_{wd}(16in)$ 、 $\rho_{wd}(28in)$ 、 $\rho_{wd}(40in)$  分别为不同源距探头（16in、28in、40in）记录的高频随钻电阻率； $\phi_n$  为中子孔隙度； $S_{wo}$  为原始含水饱和度； $\phi_e$  为有效孔隙度； $\phi(sh)$  泥质体积分数； $K$  为渗透率。

**Figure 6.** The lithological profile in openhole  
**图 6.** 裸眼井岩性剖面

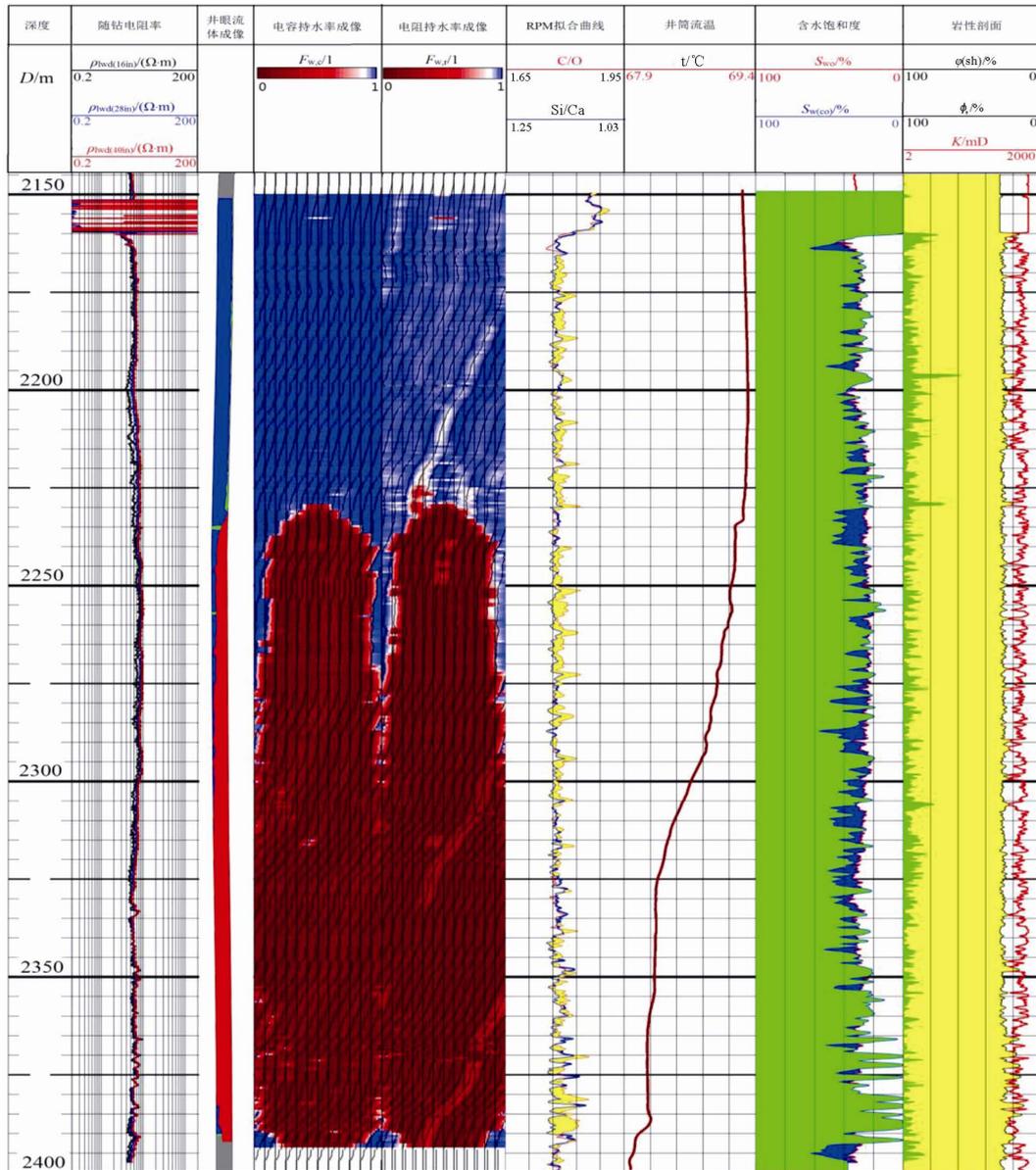
从图 7 为 RPM-C/O 解释成果图，可以看出，整个测试段 C/O 和 S/C 曲线都存在明显的包络，反映测试段仍具有较好的含油性；但是 2230.0~2240.0 m、2275.0~2327.0 m、2392.5~2397.0 m 井段 C/O 曲线存在明显降低的趋势，计算出的目前含水饱和度分别较原始含水饱和度升高 16.8%、9.3%和 21.9%，反映 3 个井段的含水饱和度上升较多，认为是 A 井的出水段。



注： $q_{ccl(CO)}$  为 RPM-C/O 模式测量的磁定位； $q_{ccl(PNC)}$  为 RPM-PNC 模式测量的磁定位；C/O 为拟合后的碳氧比；Si/Ca 为拟合后的硅钙比； $S_{w(c)}$  为 RPM-C/O 模式计算出的含水饱和度。

Figure 7. The diagram of RPM-C/O interpretation result  
图 7. RPM-C/O 解释成果图

将井筒出水分析与地层出水分析结果综合，形成如图 8 所示的综合解释成果图。



注：t 为井温。

Figure 8. The diagram of integrated interpretation result  
图 8. 综合解释成果图

从图 8 中可以看出，MAPS 测井分析出水位置、RPM 测井解释含水饱和度上升较高位置及温度曲线变化三者具有较高对应性，在出水点的解释上基本一致，即：2392.5~2397.0 m 井段，CAT、RAT 反映井筒底边存在少量积液，对应温度曲线存在小幅度拐点，同时该井段含水饱和度上升较多，综合分析为 A 井少量出水井段；2275.0~2327.0 m 井段，CAT、RAT 显示井筒底边间断出现积液，由下往上积液量逐渐累加，对应温度曲线表现为多处小幅度拐点，同时 RPM 成果显示为多处含水饱和度小幅上升，综合分析该井段为 A 井点状出水井段；2230.0~2240.0 m 井段，CAT、RAT 显示井筒底边积液较多，经过 2240.0 m 后整个井筒充满水，温度曲线同样在 2240.0 m 处有一大幅突变拐点，而反映在 RPM 上则表现为稳定的、

含水饱和度大幅升高, 综合分析该井段为 A 井整段出水井段。

通过 MAPS 和 RPM 的组合生产测井方法, 成功获取了 A 井井下流体性质和剩余油饱和度分布, 并准确识别出该井不同出水位置和出水类型。

通过对 A 井井史和测试资料综合分析, 认为该井物性好、剩余油饱和度较高, 仍具有一定的产能, 井口产量低可能是由于近井带(筛管)通过性差, 导致地层流体无法正常产出造成, 建议采取筛管解堵的方法, 疏通流通渠道。

## 5. 结论

1) 阵列式多相流测井仪组合 MAPS 能够对水平井截面速度剖面 and 流体性质分布进行精确解释, 可以准确识别井筒内出水位置。

2) 尝试并验证了 RPM 仪器在水平井剩余油饱和度分布监测中的适用性, 可以准确识别地层含水饱和度和升高位置。

3) MAPS 和 RPM 组合的测井模式为水平井稳油控水作业提供了重要依据, 为海上水平井生产测井提供了宝贵经验。

## 参考文献 (References)

- [1] Hemanta, K.S. 水平井技术研究展望[C]//刘翔鹏, 刘尚奇. 国外水平井技术应用论文集. 北京: 石油工业出版社, 1999: 57-65.
- [2] 周生田. 水平井变质量流研究进展[J]. 力学进展, 2002, 32(1): 119-127.
- [3] 水平井生产测井技术的现状和发展[J]. 石油物探译丛, 1999(6): 1-8.
- [4] 贺晓飞. 水平井生产测井新技术[J]. 国外石油地质, 1999, 21(3): 46-47.
- [5] 吴锡令. 石油开发测井原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 111-124.
- [6] 黄志洁, 王林根, 徐凤阳, 等. 动态监测技术在海上某 1 油气田的应用[J]. 测井技术, 2008, 32(3): 281-284.
- [7] 黄志洁, 邱细斌. 储层性能监测仪(RPM)及其应用[J]. 石油仪器, 2004, 18(2): 43-46.

[编辑] 龚丹

**Hans** 汉斯

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [jogt@hanspub.org](mailto:jogt@hanspub.org)