

电缆地层测试技术新进展

Cosan Ayan
法国巴黎

Pierre-Yves Corre
法国Abbeville

Mauro Firinussss
埃尼勘探与生产公司
意大利Ravenna

German Garcia
墨西哥墨西哥城

Morten R. Kristensen
阿联酋阿布扎比

Michael O'Keefe
英国伦敦

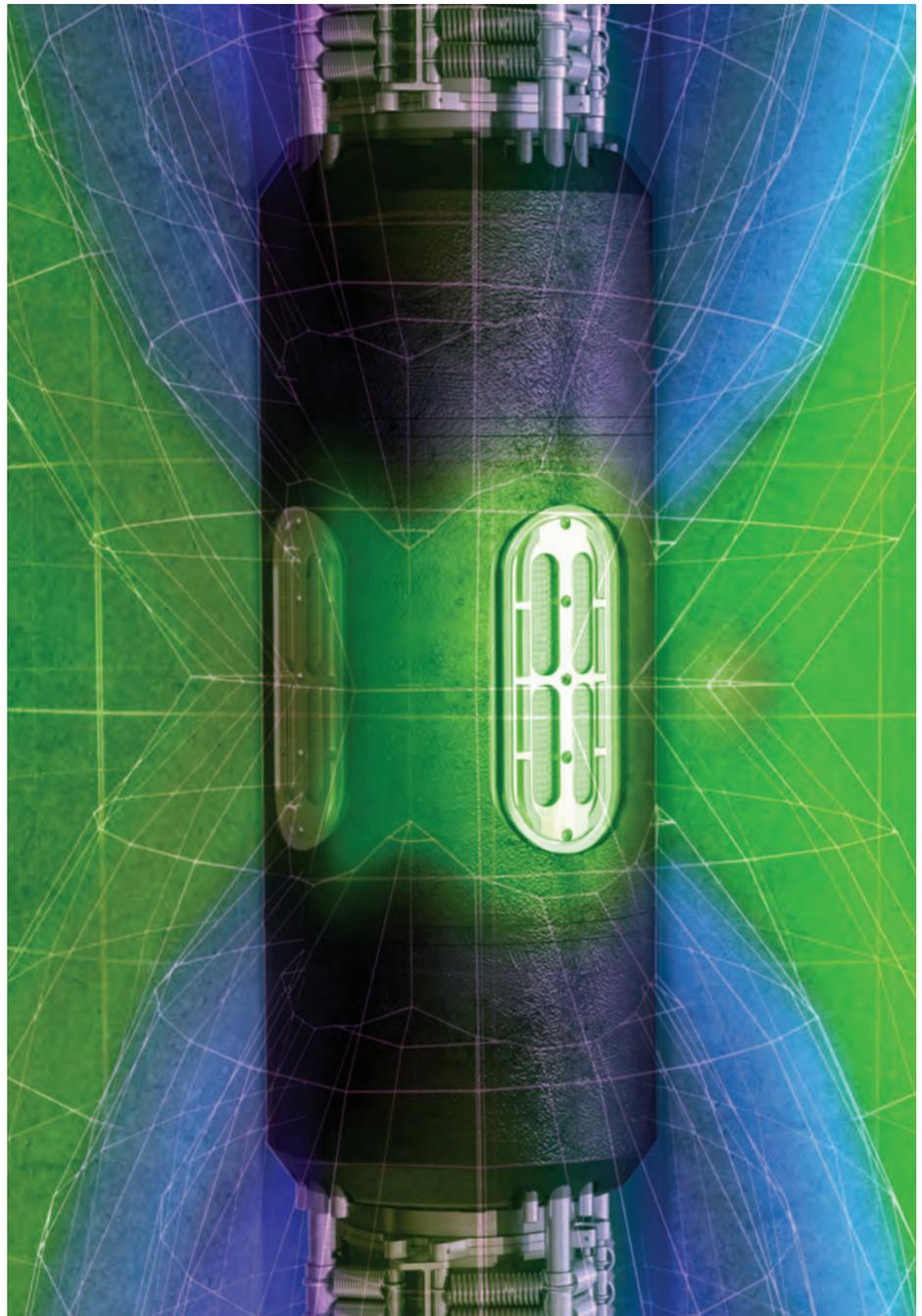
Thomas Pfeiffer
挪威斯塔万格

Chris Tevis
美国得克萨斯州Sugar Land

Luigi Zappalorto
埃尼挪威公司
挪威斯塔万格

Murat Zeybek
沙特阿拉伯宰赫兰

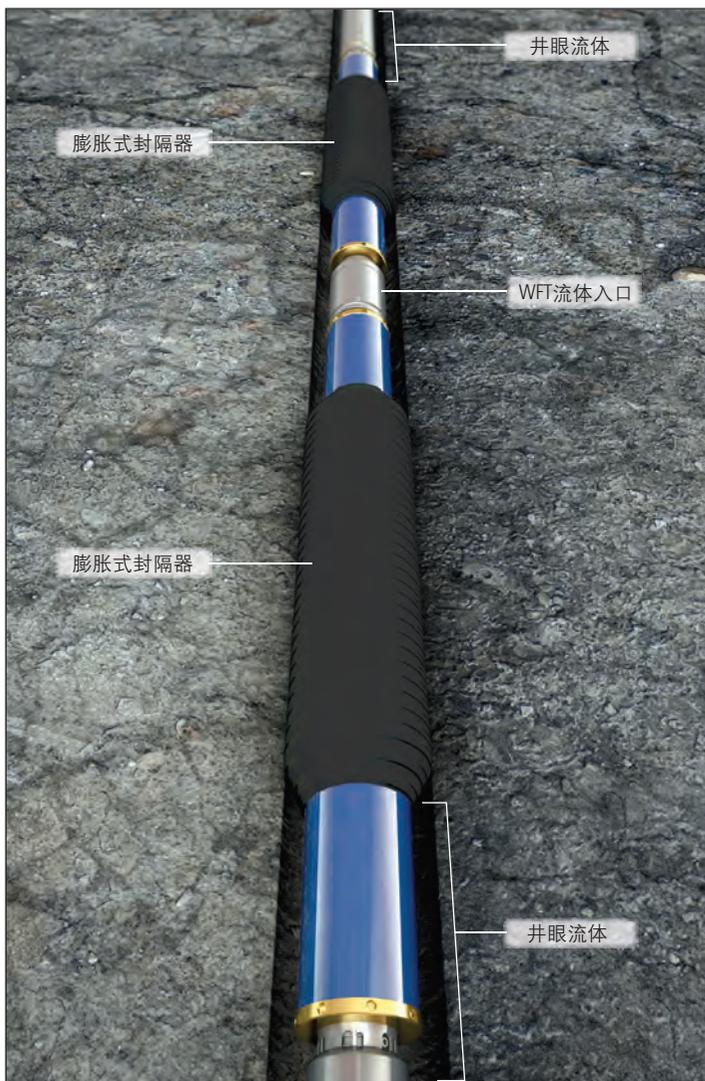
在某些地层和油藏流体类型的情况下，作业者使用常规电缆地层测器进行压力测量和流体取样遇到了一定的困难。工程师最近开发出的仪器可在困难的环境下，如低流体流度地层和稠油环境，进行可靠的地层测试。



《油田新技术》2013年春季刊：25卷第1期。
©2013斯伦贝谢公司版权所有。

ECLIPSE, MDT, Quicksilver Probe和Saturn等是斯伦贝谢公司的商标。

1. 有关地层测试的详细信息请参见：Ayan C, Hafez H, Hurst S, Kuchuk F, O' Callaghan A, Peffer J, Pop J和Zeybek M: "Characterizing Permeability with Formation Testers", 《油田新技术》, 13卷, 第3期 (2001年秋季刊): 2-23。



▲ 跨式双封隔器电缆地层测试仪器 (WFT)。一些 WFT 在取样和瞬变测试过程中使用液压膨胀式封隔器对地层进行隔离，以避免井眼流体的污染。

工程师在对油藏进行特征描述并进行完井设计以最大限度提高生产效率的过程中，很大程度上依赖于对油藏流体样品进行分析并进行瞬变压力测试。油藏工程师和岩石物理师使用多种数据准确评估储量并建立有代表性的油藏模型。其中包括流体组分，孔隙压力测量，油藏温度，油藏对压力变化的响应，以及与地震资料的整合等。

以前，大多数地层流体样品都是在钻杆测试以及生产测试过程中达到地面后收集的，然后再将其分离成气、

油和水等组分。这些样品被转移到异地实验室进行分析。试井继续为工程师提供有关油藏流体、油藏规模以及生产潜力等有用的数据。但是，对在地面收集的样品进行流体特征描述存在一定的问题。在地面对分离流体进行重新混配需要格外小心：在采集和运输过程中，技师往往很难避免样品污染或是造成压力损失，在偏远地区作业时更是如此。在实验室重新建立地下条件非常困难，但进行准确分析要求必须重建井下条件。

20 世纪 50 年代，业界引入了电



▲ 探针式 WFT。探针式仪器下入指定深度后，仪器从 WFT 的一侧将活塞伸出顶靠至井壁，与此同时封隔器总成被紧紧推靠至待测试的地层。之后，封隔器总成中部的探针深入地层。储层流体通过探针流入到仪器的管线以及取样室，然后将其取至地面。探针周围的封隔器密封阻止井筒流体与储层流体进行混合。

缆地层测试器 (WFT)，通过测井电缆将测试器下到目的层，以解决上述以及其他一些取样难题。这类仪器一种最新的版本使用跨式双封隔器在取样点上下进行坐封以便将地层与井筒流体隔离，使地层暴露更大的范围进行取样 (左上图)。然后，使地层流体流入或是泵入仪器中进行收集并回收至地面。

探针式 WFT 使用液压操作臂迫使封隔器总成顶靠在井壁上 (上图)。探针位于封隔器中央，深入地层后，油藏流体流入或是泵入仪器内。在井下对流体进行分析，在使用井下压力计测量压力的过程中可以收集样品。在使流体流入样品室之前对其进行纯净度分析。这使得电缆测井工程师在采集地层样品之前去除掉收污染的样品。在将样品回收至地面的过程中，取样瓶使流体保持在地层压力下，然后将其送到实验室进行分析^[1]。

WFT 取得的流体样品往往要比在地面收集的油藏流体更具有代表性。然而，早期仪器中使用的探针在某些地层中不适用，很难建立起密封条件。此外，在流体缓慢流入仪器的地层中进行测试会延长仪器在取样点的停留时间，常常出现样品被泥浆滤液污染的情况。而且，高粘地层流体只有在井筒和地层之间形成相对较高压差时才能流入井筒。这一压降（或压差）可能会超出 WFT 封隔器的额定压力，或使未固结地层井壁崩落，从而导致封隔器总成周围的密封失效^[2]。高压差还可能使仪器处的压力降低至泡点压力以下，从而在油中产生自由气或是造成组分变化，从而影响样品的完整性。

在某些井况条件下，使用常规单探针 WFT 难以获得有代表性的样品，因为密封封隔器仅将地层或探针总成与井筒的钻井或完井液隔离。侵入到渗透性地层中的流体也可能使样品受到污染。为了获取相对纯净的油藏流

体样品，工程师使用泵出模块（WFT 仪器串中包括的微型泵）使地层流体流过仪器并进入井筒，直至污染物被全部泵出。通过各种传感器在井下对流入流体的特性进行分析。然后使流体流向取样瓶，对流体进行收集和保存，然后运送到地面实验室进行分析。

在任何情况下，获得有代表性的储层流体样品都是一个挑战，因为工程师很难知道流体何时具有足够的纯净度。工程师必须依靠油藏以及污染侵入的特性和多少来计算在给定流速下地层流体流动达到纯净所用的时间。以下因素使这一计算进一步复杂化，即储层流体以锥形体方式向探针流动，受到近井筒侵入带以及沿井筒方向一定垂直距离上污染物的影响。该流动的外边界可能含有很多非储层流体，可能需要更长的时间将其泵出。而且，工程师往往低估这一过程需要的时间，因此得到的样品不具有代表性。相反，如果工程师高估了这一时间，那么在取样点上会停留过长的时间，从而增加成本。

对 WFT 的设计改进旨在克服上述限制。例如，为了缩短流动时间并确保获得有代表性的样品，斯伦贝谢的

工程师开发出了 Quicksilver Probe，对纯净储层流体进行聚焦取样，使用两个同心取样区域将流体泵入仪器。外部环形区域是流体受污染较为严重的区域，在井筒处排掉。内部探针流入的流体是锥形流动内部区域更具代表性的流体，之后可将其导向进入 WFT 取样瓶（下图）^[3]。

另外一个创新改进（井下流体分析 DFA）使用光谱识别储层流体流过 WFT 时的组分。该技术使工程师能够确定污染程度，在污染程度达到可以接受的水平后才开始取样。在单井以及多井中的选择层段使用 DFA，工程师可以获得以前无法得到的进行油藏结构分析的数据。

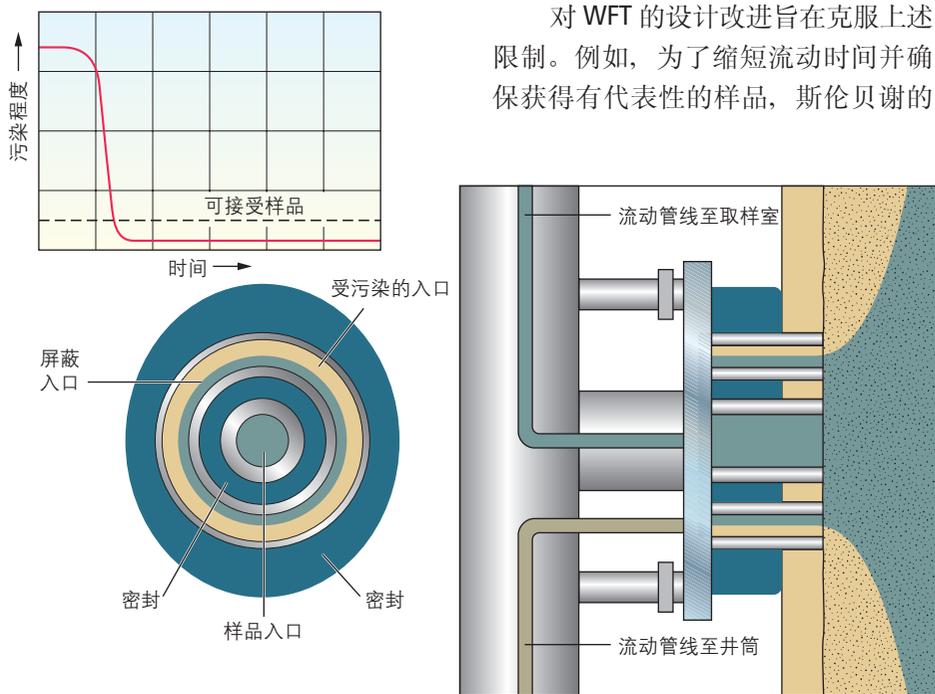
持续的挑战

在大多数类型的地层中，对 WFT 进行改进的技术都大大提高了作业者获得有代表性流体样品从而进行分析的能力，与此同时还可获得高精度井下压力数据。但某些作业方面的限制、未固结砂岩地层、稠油以及低渗透率岩石等仍就对取样成功率产生影响。

传统的跨式双封隔器是针对这些情况的一种解决方案。然而，这一解决方案也有一定的作业问题。在大井眼中，封隔器需要较长的膨胀时间，它们在测试层段上下的相对位置形成较大的存储体积。这一存储体积的影响会大大增加获取纯净流体所需的时间，并在对低渗透率地层进行瞬变测试时带来麻烦^[5]。

在对低流度地层进行测试时，在泵出过程中的压降可能变得很高。形成的压差可能会超过现有跨式封隔器的额定压力 31 MPa (4500 psi)。高压差还可能是未固结砂岩地层中高粘度流体流动的结果，从而造成密封失效，甚至造成井壁崩落。

易碎地层由于地层砂堵塞探针和流动管线也可能使取样作业失败。此外，在低力学强度岩石进行钻井常常会高度粗糙的井筒，规则井段很少，



▲ 使用 Quicksilver Probe 聚焦取样仪器进行地层流体取样。探针有两个吸入口，屏蔽入口在取样入口周围（左下）。封隔器在这些探针周围并将其分开，与井壁之间密封（右）。蓝灰色表示地层流体，浅棕色表示泥浆滤液。当开始泵抽时，流过样品入口的流体污染程度很高（左上），但很快会达到可接受的水平。

很难获得良好的封隔器密封。

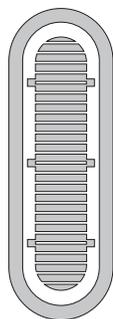
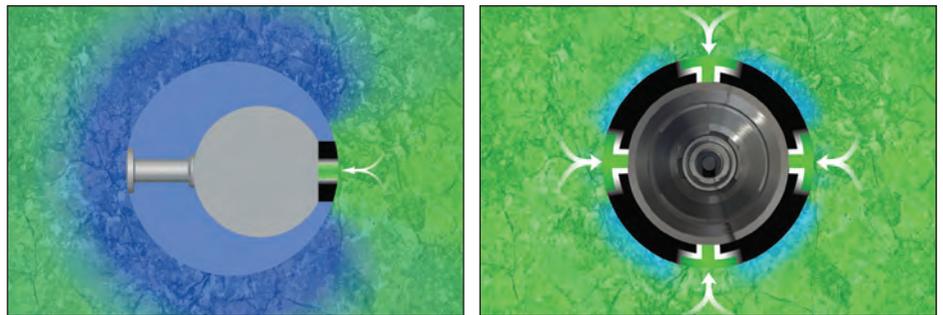
为了解决这些问题，工程师在近年使探针的尺寸增大了 10 倍，并改变了探针形状的设计使其更好地适应不同的地层类型。能够形成较大过流面积的探针提高了在致密和易碎砂岩地层应该的成功率，双封隔器技术使压差额定数值提高到了 40 MPa (5800 psi)。DFA 测量还能帮助确保样品纯净度，与取至地面并运送到实验室的样品相比能够进行一系列不同的复杂流体分析。斯伦贝谢公司的工程师最近对 WFT 进行了进一步改进，开发出了在地层和仪器之间能够提供较大流动面积的探针，与此同时还能提供更好的密封。

径向解决方案

为了解决压差限制以及相关的密封和封隔器失效等问题，斯伦贝谢的工程师开发出了 Saturn 三维径向探针。该仪器使用 4 个长条形入口沿模块周围等间隔分布，而不是使用单探针或双封隔器。单一膨胀式封隔器将每个入口与井筒进行隔离，与地产生之间形成较大的密封表面（右图）。

与单探针 WFT 封隔器相比，Saturn 探针使用的封隔器在粗糙井眼中的密封更可靠，而且与跨式双封隔器相比膨胀减压速度更快，与此同时完全消除了存储体积。4 个入口嵌入封隔器内，每一入口都比常规探针上的入口大很多，从而进一步加快了获取纯净样品的速度。

清洁时间—层段测试时间的主要组成部分—是使井流动直至消除储层流体污染或是降低至可接受水平所需的时间。缩短测试时间的一个关键是通过较高流量来缩短清洁时间。为了测试 Saturn 探针设计能否实现这一目标，油藏工程师建立了数值模型，将使用 Saturn 探针时的时间与使用超大直径 (XLD) 探针时的时间进行比较。



Saturn 三维径向探针使用 4 个入口，与标准探针相比，使探针表面积增加 500 多倍。

Saturn 三维径向探针	椭圆形探针	超大直径探针	Quicksilver Probe 探针	大直径探针	标准探针
79.44	6.03	2.01	1.01	0.85	0.15
表面流动面积, 英寸 ²	表面流动面积, 英寸 ²	表面流动面积, 英寸 ²	表面流动面积, 英寸 ²	表面流动面积, 英寸 ²	表面流动面积, 英寸 ²

▲ Saturn 探针。Saturn 探针通过等间距分布在仪器四周的较大入口收集流体样品。当封隔器膨胀后，使入口顶靠井壁，从而在储层流体和井筒流体之间形成密封。仪器的形状设计使储层流体（绿色）呈径向流动型式（中、右），并能快速清除被污染的流体（蓝色）。这与典型的 WFT 的流动型式（中、左）不同，后者在仪器的一侧有一个入口。Saturn 探针的流动面积比常规探针的流动面积大许多倍（下）。

2. 压降是指诱发流体从地层流入井筒的压差条件。当井筒压力低于地层压力就会出现压降，可能是自然发生，也可能是由于泵抽或井的开采而产生。
3. 有关 Quicksilver Probe 仪器更多的信息，请参见：Akkurt R, Bowcock M, Davies J, Del Campo C, Hill B, Joshi S, Kundu D, Kumar S, O'Keefe M, Samir M, Tarvin J, Weinheber P, Williams S 和 Zeybek M: "Focusing on Downhole Fluid Sampling and Analysis," 《油田新技术》, 18 卷, 第 4 期 (2006/2007 年冬季刊): 4-19。
4. 有关井下流体分析更多的信息，请参见：Creek J, Cribbs M, Dong C, Mullins OC, Elshahawi H, Hegeman P, O'Keefe M, Peters K 和 Zuo JY: "Downhole Fluids Laboratory," 《油田新技术》, 21 卷, 第 4 期 (2009/2010 年冬季刊): 38-54。
5. 井筒流体膨胀和压缩效应会使压力瞬变分析中使用的油藏对压力变化的响应发生畸变。压力瞬变分析中的一个关键要素是区分井筒存储效应和真实的储层压力响应。

常规参数	数值		
孔隙度	20%		
水平渗透率	10 mD		
垂直渗透率	2 mD		
井筒直径	21.6 cm [8.5 in.]		
地层厚度	50 m [164 ft]		
仪器距边界的距离	25 m [82 ft]		
地层压力	21 MPa [3,000 psi]		
清洁过程中最大压降	4 MPa [600 psi]		
最大泵出速率	25 cm ³ /s [0.4 galUS/min]		
滤液侵入深度	10 cm [4 in.]		
混相清洁参数	数值		
油粘度	1 cP		
油基泥浆滤液粘度	1 cP		
模型输出	数值		
油粘度	1 cP		
水基泥浆滤液粘度	0.6 cP		
相对渗透率	亲水	亲油	
残余油饱和度	0.10	0.30	
束缚水饱和度	0.20	0.15	
水相对渗透率	0.20	0.80	
油相对渗透率	1.00	0.60	
水和油岩石指数	3.0 和 1.5	1.5 和 3.0	
原生水饱和度	0.12	0.12	
模型输出	混相清洁	非混相清洁, 亲水	非混相清洁, 亲油
Saturn 3D 径向探针	0.71 h	0.42 h	0.99 h
XLD 探针	9.10 h	7.17 h	14.61 h
Saturn 相对 XLD 探针提高速度	12.8	17.0	14.8

▲ 清洁测试模拟的参数。工程师使用基于特定井筒、地层、流体和模拟参数（上）的油藏模型，对 Saturn 探针、跨式双封隔器以及 XLD 探针的清洁效率进行了比较。模型输出结果（下）证明，对于亲水和亲油砂岩不同的垂直和水平渗透率而言，Saturn 探针较大的流动面积大大缩短了清洁时间。模拟结果考虑了双封隔器存储体积的影响。在这些模拟中，假定存储体积为 17 升（4.5 加仑），假定油基泥浆和水基泥浆滤液在存储体内随即发生分离。封隔器之间的层段高度为 1.02 米（40 英寸）。

研究团队使用 ECLIPSE 油藏模拟软件对三种探针配置进行了分析。对于混相污染，研究人员对单一相流体系统进行了模拟，并使用嵌入示踪剂表示钻井液污染。此外，研究人员还对亲油和亲水系统进行了非混相模拟。

在模拟实验中，工程师考虑了渗透率、各向异性、滤液与油之间的粘度差异、侵入前沿的扩散以及侵入范围等参数。在混相污染清洁情形中，工程师发现尽管对 XLD 探针而言地层油的突破更快些，利用 Saturn 三维探针在总泵出体积较小的情况下能够收集到较纯净的样品。在对非混相污染清洁进行模拟时，使用了粘度为 1.0 cP (1.0 mPa.s) 和 0.6 cP (0.6 mPa.s)

的泥浆滤液。在使用典型的水湿和油湿相对渗透率的情形中，达到 5% 污染的清洁时间与混相污染情况类似(上表)^[6]。

因为使稠流体流动经常会产生很高的压降而造成弱地层破裂，因此在固结较差的砂岩地层使用高粘流体通常是电缆地层测试最大的难题之一。

流体从储层流向取样仪器的动态由达西定律所决定，即流量直接与渗透率、压降压力以及横截面积成正比，与流体粘度以及压降范围上的长度成反比。Saturn 探针的流动面积大约比传统 XLD 探针的流动面积大 40 倍，因此降低了使稠流体或低渗透率地层流体流动所需的压降压力（下一页，上

图）。

过去，传统 WFT 方法使作业者只能在传统探针的较高压降和较低流量与跨式封隔器的较大流量之间进行选择。较低流量的缺点不再是清洁时间。另一方面，虽然双封隔器与传统探针相比允许有更高的流量，但它们会形成大的存储体积并可能失去密封，因为在非固结地层中不能提供必要的井壁支撑。Saturn 探针设计具有探针和双封隔器的优点：大的流动面积可缩短清洁时间，封隔器 - 探针配置可提供井壁支撑以形成更可靠的密封。

Saturn 三维径向探针新方法使作业者能够在不能的条件下收集样品，进行 DFA 和识别瞬变流动系统，其中包括低渗透率地层、稠油、未固结地层、接近泡点的单相流体以及超致密地层等等。

对理论进行验证

某作业者使用了 Saturn 仪器来区分以前使用传统仪器很难进行地层测试的油层和水层。其中的一个问题是地层测试中泥浆漏失使得取样时间限制在每个测点为 4 小时。由于这些地层还是低流度地层，这一作业限制使得使用传统探针难以收集样品。

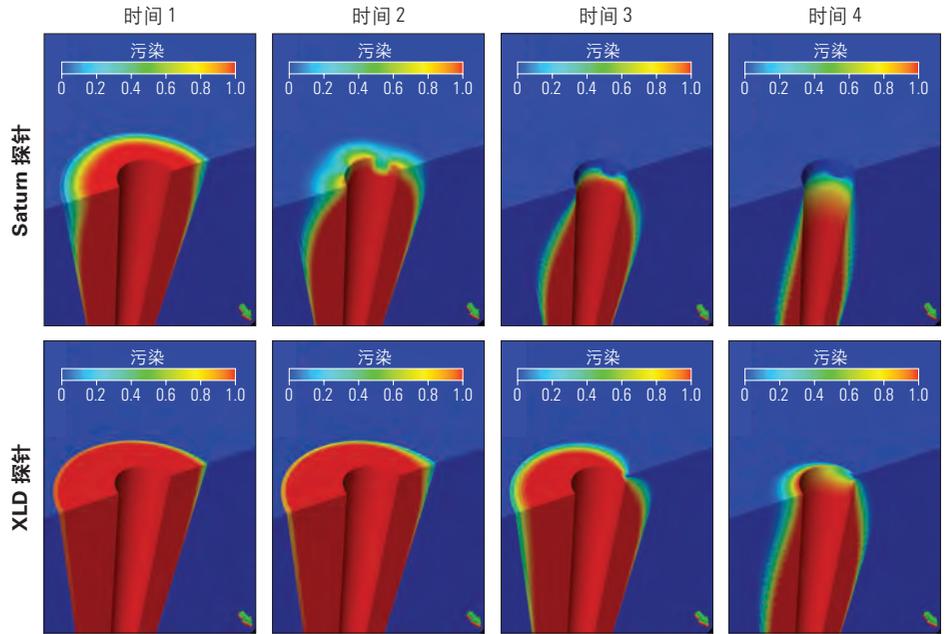
工程师将该作业视为比较 Saturn 仪器与传统取样方法一次很好的机会。他们设计了 WFT 仪器串，其中包括 XLD 探针、Saturn 探针、DFA 组分模块以及几个取样瓶。在仪器下入井中的过程中，工程师进行了多次压力测量，在将仪器从井中回收的过程中收集了 7 个样品。

6. Al-Otaibi SH, Bradford CM, Zeybek M, Corre P-Y, Slapal M, Ayan C 和 Kristensen M: "Oil-Water Delineation with a New Formation Tester Module," SPE 论文 159641, 发表在 SPE 技术年会暨展览会上，美国得克萨斯州 San Antonio, 2012 年 10 月 8-10 日。

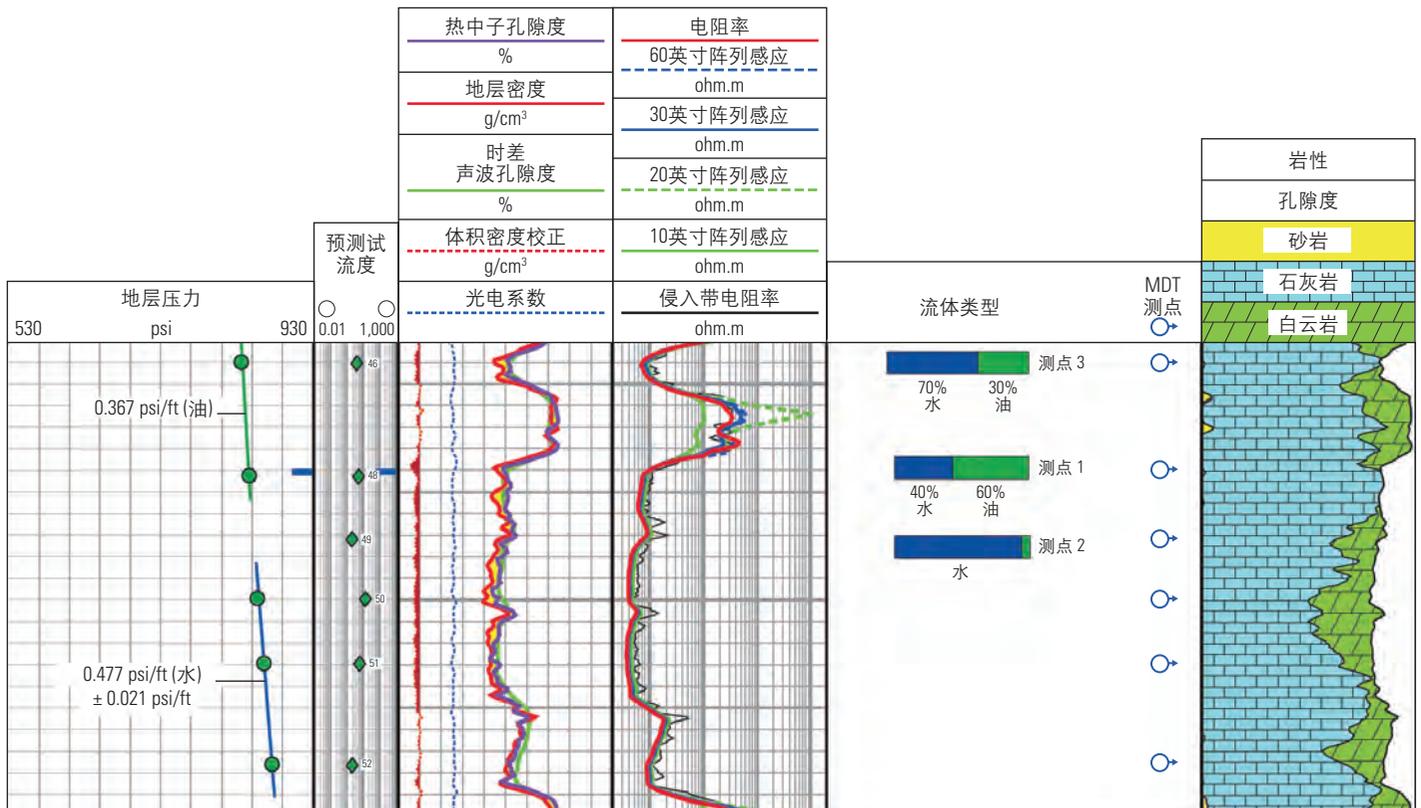
7. 流度是地层渗透率与流体粘度的比值。因此，较低的地层渗透率或较高的流体粘度都使流度降低。

在第一个测点，在 DFA 测量识别出流动流体中含油为 60—70% 之后，使用 XLD 探针收集了样品。作业者选择了第二个测点以确定最低可动油的深度。工程师在第二个测点试图使用 XLD 探针收集样品，但在压降为 13.8 MPa (2000 psi) 的情况下，只能达到 5.2 升/小时 (1.4 加仑/小时) 的流量。在泵出 1.5 小时后，将流动调至 Saturn 探针，尽管流量增加到了 7.8 升/小时 (2.1 加仑/小时)，相应的压降仅为 4.7 MPa (680 psi)。在这些条件下，流动达到稳定，工程师得以在以前提到的 4 小时限制时间内识别出了油水层。

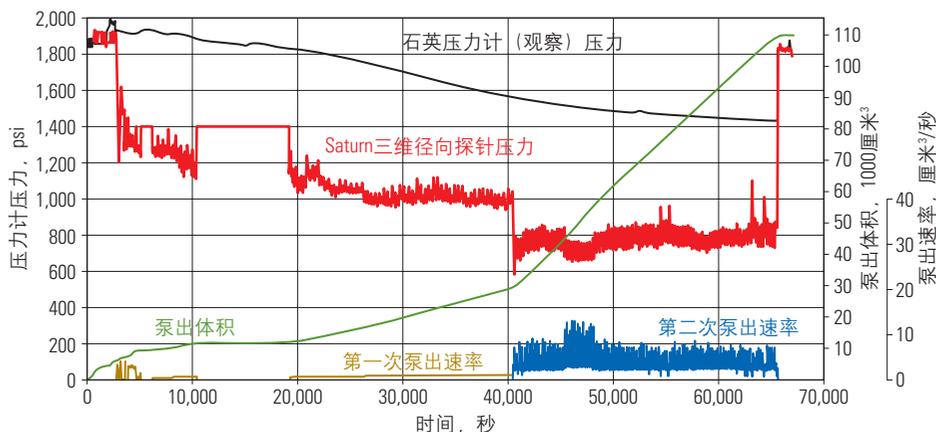
在使用 XDL 探针对第二个测点进行取样的同时，工程师观察到清洁期间泵出的头 34 升 (9.0 加仑) 流体中没有油 (下图)。在考虑了 XLD 探针的贡献率后，工程师断定，使用 Saturn 探针，油到达仪器的速度更快，工程师认为这是流量增加以及径向清洁产生的结果。



▲ 三维污染分布。使用 Saturn 探针和 XLD 探针清洁的模型在 4 个时间点上进行了显示。对 XLD 和 Saturn 探针都使用了相同的压降，但是由于其流动面积较大，而且是圆周上多个点吸入流体，Saturn 探针能够在较高的泵速下工作，最终实现清洁速度比 XLD 探针快 12 到 18 倍。(改编自 Al-Otaibi 等人，参考文献 6)。



▲ 发现油层。在中东地区的这口井中，根据地层压力 (第 1 道)，流度 (第 2 道)，密度 - 中子 - 声波 (第 3 道) 以及电阻率 (第 4 道) 等测井资料，分析人员可能认为目标层不含油。然而，泵出过程中的 DFA 测量 (第 5 道) 表明在该碳酸盐岩地层有油存在。



▲ 流体取样。使用 Saturn 仪器在目的层采集流体仪器并进行压力测量（红色）。最初的测量是泥浆压力。大约在 2500 秒处，仪器就为井开始泵出流体，之后是在约 10000 秒处进行压力恢复，确定出油藏压力的估算结果。在 40000 秒左右重新开泵进行清洁时，总的累积泵出体积（绿色）开始增加。由于泵速较高以及高粘度油到达仪器，压降增加。在大约 55000 秒处的两个压力尖峰是由于收集样品之后停泵产生的压力震动造成的。还利用观察探针记录了压力（黑色）。最右侧坐标轴分别记录了第一次和第二次的泵出速率（棕色和蓝色）（单位为厘米³/秒）。（根据 Flores 等人的资料改编，参考文献 10）。

作业者还对该油田的一个低孔隙度、低电阻率地层进行了测试。第一次使用 XLD 探针进行了测试，产生了 13.8 MPa 的压降，流量小于 72 升/小时（19.0 加仑/小时）。工程师使用 Saturn 探针在流量为 288 升/小时（76.1 加仑/小时）的情况下把压降降低到 7.6 MPa（1100 psi）。因此，工程师使用 DFA 模块的光学密度测量结果能够收集足够的样品，以划分油水接触面。

还利用 Saturn 探针在一个低流度地层识别出少量的油，而利用标准 XLD 探针是无法在该层泵出流体的。最后，作业者使用取样和 DFA 来确定非均质碳酸盐岩地层的油水界面，该地层的电阻率为 0.7 欧姆米。在该例中，工程师得以使用 DFA 测量结果结合 Saturn 仪器收集的流体样品来确定油层的厚度，而使用传统的取样方法是无法完成测试任务的^[9]。

稠油的挑战

对常规井下取样装置来说，稠油尤其会带来比较大的麻烦。通过适当布置注入井和生产井来开采稠油资源高度依赖于对流体准确描述。由于常常采用注蒸汽和人工举升的方法使高粘度油流入井筒之后采到地面，因

此作业者掌握由相对高渗透率岩石或低粘度流体产生的储层内较高流动地层的情况至关重要。以上两种情况都可能会形成高流度流体优先流动通道，油和蒸汽通过这些通道流动经常会导致大量的储量被漏掉。

2011 年，墨西哥国家石油公司（PEMEX）报告指出该国 60% 的石油储量是稠油和超稠油^[9]。随着较为容易开采的储量不断得到开发，对 PEMEX 以及墨西哥而言稠油储量变得日益重要。在墨西哥南部的 Samaria 稠油油田，PEMEX 正在试图对井下条件下粘度高达 5000 cP（5000 mPa.s）的稠油进行开采，稠油地层的无限抗压强度在 0.69—5.5 MPa（100—800 psi）之间^[10]。由于未固结地层中高粘度流体给测试带来很大的挑战，作业者虽然能够使用 WFT 在这些地层中进行压力测量，但不能收集流体样品。在 Samaria 油田，PEMEX 公司的工程师选择了对每个层进行单独射孔和流动的方法，并通过连续油管或钻柱部署取样瓶。但由于该方法被证明不切实际而且成本高—每个层经常用时达数天或数周—因此作业者放弃了使用这一取样方法。

随着 PEMEX 工程师对这些第三

纪砂岩的开发进行新的周期，他们于 2011 年开始使用 Saturn 探针来对 4 口井进行评价。在第一口井中应用的主要目的是验证这一新型仪器的功能。在第二和第三口井中，工程师转向了全压力测试，进行流体扫描和取样。在第四口井中，他们还设计了层段和垂直干扰试井等内容。

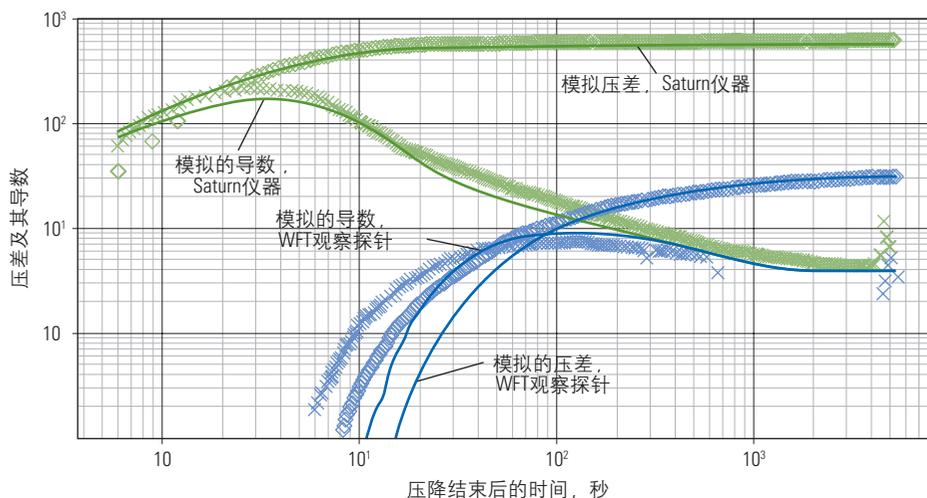
在每口井中对多个测点进行了测试和取样。由于地层是未固结的，井筒经常比较粗糙、不规则，使用传统探针在清洁和取样前就可能失去密封。在第一口井中，使用 XLD 探针和 Saturn 探针进行了测试，以验证新系统的密封效果，并对一些变了进行调整，包括坐封和解封时间、达到密封的最小膨胀压力以及校正存储效应的最优预测试体积。

8. Al-Otaibi 等人，参考文献 6。

9. 墨西哥国家石油公司（PEMEX）勘探与生产公司：“2011: Las reservas de hidrocarburos de México.”墨西哥城：PEMEX（2011 年 1 月 1 日）：22（西班牙文）。

10. Flores de Dios T, Aguilar MG, Perez Herrera R, Garcia G, Peyret E, Ramirez E, Arias A, Corre P-Y, Slapal M 和 Ayan C: “New Wireline Formation Tester Development Makes Sampling and Pressure Testing Possible in Extra-Heavy Oils in Mexico,” SPE 论文 159868, 发表在 SPE 技术年会暨展览会上，得克萨斯州 San Antonio, 2012 年 10 月 8-10 日。

11. Flores de Dios 等人，参考文献 10。



▲ WFT 干扰测试。Saturn 探针在单探针 WFT 之下进行测量。工程师进行了层段压力瞬变测试，获得了垂直渗透率 (k_v) 和水平渗透率 (k_h)。较浅位置的观察仪器 (蓝色) 和 Saturn 仪器 (绿色) 记录了压差及其导数。分别使用 12.2 米、640 mD、120 mD 和 370 cP, k_v 、 k_h 以及粘度等数据建立了模型。模拟数值 (蓝色实线和绿色线) 很真实地再现了这些数据，表明垂直和水平渗透率数值是准确的。(根据 Flores de Dios 等人的资料修改，参考文献 10)。

Saturn 探针在 7 个测点都实现了 100% 密封，使用的封隔器膨胀压力低至 0.2 MPa (30 psi)。因此，工程师得以在油基和水基泥浆环境下获得压力测量结果，对压力响应只有轻微的存储效应。PEMEX 工程师使用压力测量结果和根据预测试确定的流度进行完井设计，根基该设计将在指定层段均匀分布注入蒸汽，提高驱扫效率。

随着对 Saturn 仪器测试应用的继续，工程师利用仪器串在 3 口井中收集到了污染程度最低的流体样品，该仪器串包括 XLD 探针和 Saturn 探针、流体分析仪以及取样瓶等。由于地层未固结特性，PEMEX 工程师计划采用低压差进行测试，在每个测点用时需要 16—20 小时收集样品，其中很多时间用来在清洁过程中泵出储层流体前面的泥浆滤液。在第一个测点，在限制压差的同时，工程师在泵出大约 9 小时后观察到了油气。

之后提高泵速，压差上升到大约 200 psi (1.4 MPa)。仪器内未发现砂进入。流动用泵速也下降，表明密封

效果很好。这使得作业小组决定放弃原先低压压力的计划，对第二个测点设定 300 psi (2.1 MPa) 的最小压差 (前一页图)。在该测点收集到的污染程度很低的样品是重度为 7.5°API 的油。后来进行的实验室分析表明，该样品在井下条件下的粘度约为 1030 cP (1.03 Pa.s)，在大气条件下的粘度为 7800 cP (7.8 Pa.s)。工程师将利用样品的实验室分析结果进行油田的完井设计和生产规划。

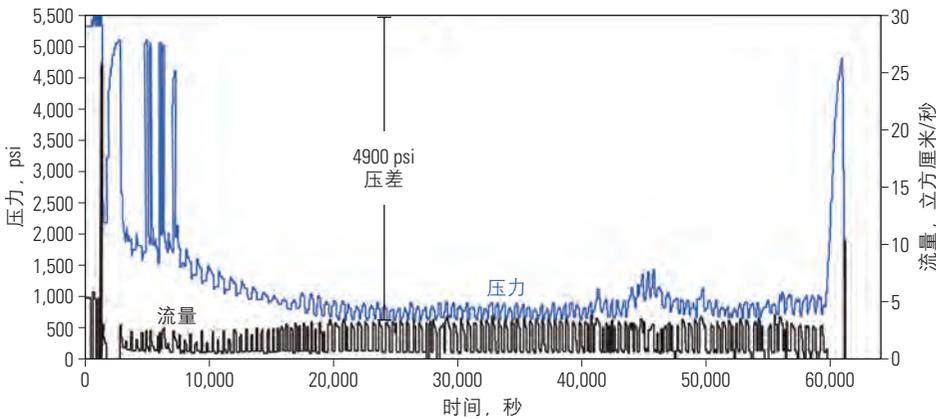
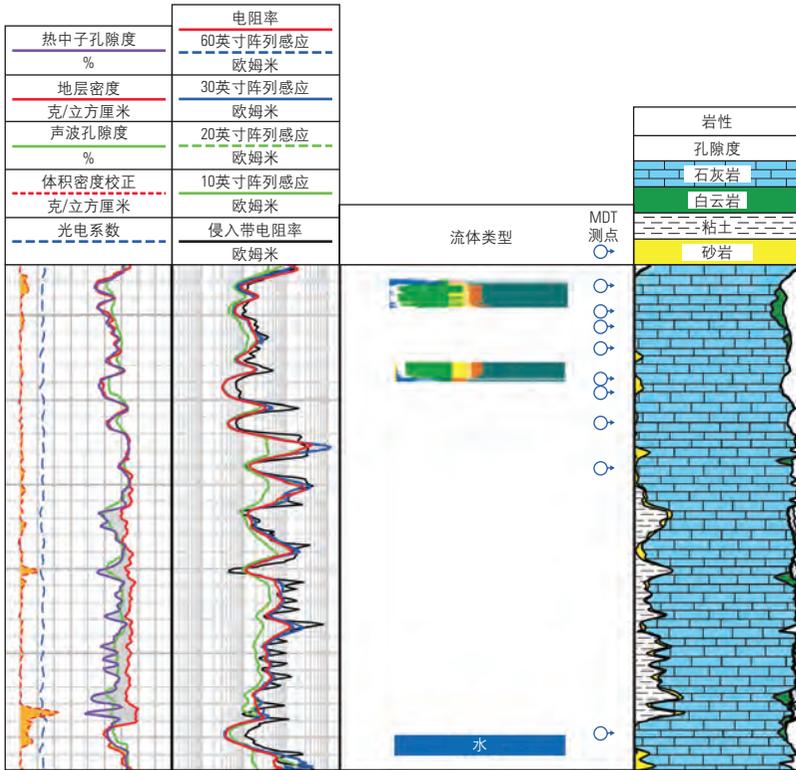
在第四口井中，工程师使用 Saturn 探针结合观察探针进行了层段压力瞬变测试。这些瞬变测试首先对泥浆滤液进行彻底清洁，之后是变速流动和关井，测试结果用于评价地层的生产能力。在仪器串上部的观察探针测得的数据为工程师提供了有关地层的渗透率和渗透率各向异性等信息 (上图)。PEMEX 工程师正在应用这一信息对核磁共振测井处理的截止值进行标定，据此对渗透率预测结果进行微调。

低流度和高可靠性

岩石物理师利用电阻率测井资料能够确定大多数地层的油 - 水界面。然而，在某些地层中，作业者很难对含水和含油地层相交处的测井响应进行解释。这一不确定性会影响到工程师选择怎样的完井方式。

某中东地区作业者试图确定致密碳酸盐岩地层中油层的延伸范围，测井资料明确指示该层顶部含油，底部含水。中部层的测井结果不明确。电阻率响应与之下水层的电阻率类似。利用传统井下取样仪器的 DFA 测量无法解决这一中部地层流体类型的问题，因为要在这一致密碳酸盐岩地层建立流动需要的压差要大于传统双封隔器的额定压力。

然而，工程师使用 Saturn 探针在全部三个层中都收集到了样品，证实了最上部地层是轻质油，最下部地层是水层。在压差为 4900 psi (34 MPa) 条件下，对流度为 0.04 mD/cP 的地层泵出 15 小时后，DFA 测量结果表明在中部地层存在可动轻质油，因此作业



▲ 低流量碳酸盐岩地层。在中东地区某地层中，电缆测井测量结果（上）无法给出肯定结论，或是给出的解释相互矛盾。孔隙度（第1道）和电阻率（第2道）测量结果指示为油层。工程师利用 Saturn 探针收集储层样品，利用 DFA 模块测量流体特性，最终解决了中部地层不确定性问题。井下流体分析（第3道）表明，与上部地层一样，中部地层也是含油层。这一致密碳酸盐岩地层中的流体流动需要压差压力为 4900 psi（下），这一数值超出了传统 WFT 和封隔器的额定压力。（根据 Al-Otaibi 等人的资料修改，参考文献 6）。

者断定油层的厚度比最初估算的厚度要大（上图）。

降压限制

在某些情况下，尽管使用传统探针也足以能够完成测试任务，但作业者有理由仍然使用 Saturn 三维径向探针。在埃尼集团的工程师看到使用新

型探针在加纳取得的成果后，其下属公司（埃尼挪威分公司）的工程师决定在巴伦支海的 Goliath 油田选择使用这一新型服务。埃尼的工程师在相对低流量的环境下将新仪器应用于砂岩地层的测试，更新油藏模型和流体接触面，并提高其对这一新技术的认识。

在测试作业过程中，地层压力测

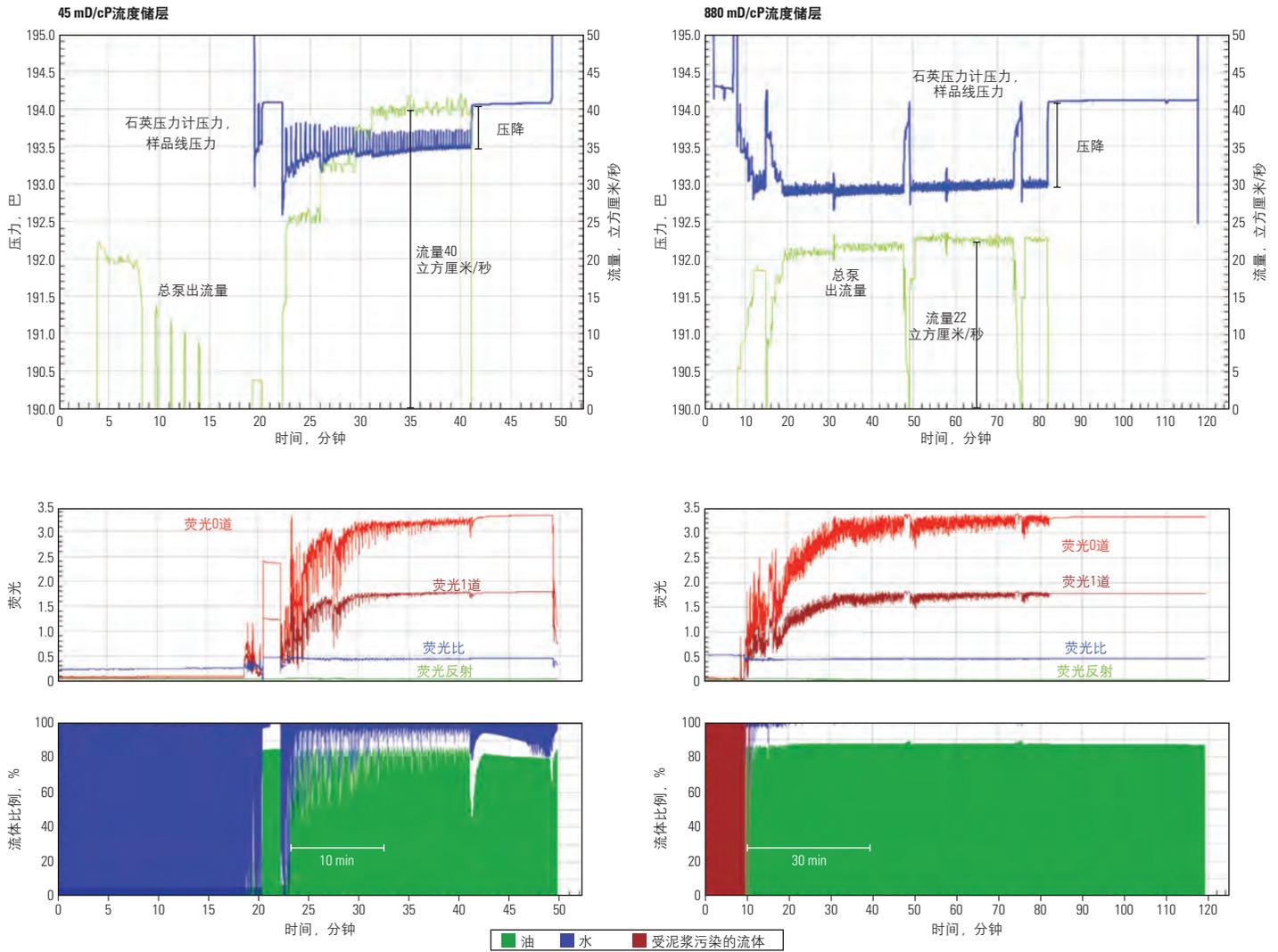
量在油柱底部遇到了一些超压低流量层。这在压力梯度的解释中引入了一些不确定性^[12]。而且，很难找到清楚的油水界面，因为电阻率测井响应可能是高含水饱和度的结果，也可能是深侵入影响的结果。Saturn 探针的流体扫描识别出的油水界面位置比压力梯度和测井响应指示的位置要深 5.5 米（18 英尺）。

此外，由于 Saturn 探针的流动面积比较大，证实了薄互层低渗透率岩石的强度。在本例中，尽管储层流体流量为中等（45 mD/cP），储层压力接近饱和压力。因此，保持低压降至至关重要，从而避免高压差引起两相流动以及不具有代表性的气油比。使用 Saturn 仪器，仅需要 0.5 巴（0.05 MPa 或 7.3 psi）的压降进行扫描分析和准确识别储层原油。在同一口井中的另外一个测点利用 XLD 还收集了样品，储层流体的流量为 880 mD/cP，比使用 Saturn 探针收集的流体样品的流量高一个数量级以上。与 XLD 探针的流量相比，Saturn 探针在一半压降的条件下取得了两倍的流量（下一页图）。这样一来，清洁时间仅是使用 XLD 时的三分之一，无需担心极端压力变化对样品完整性的影响。

未来的发展

自上世纪 70 年代以来，业界采集流体样品与关键压力数据的能力得到了快速发展。对复杂地层测试作业的要求日趋苛刻，这也促使了该领域的技术创新。工程师对弱胶结地层以及高粘度流体地层的测试日趋频繁，这就意味着每个测点的测试时间必须更少，压降范围更低，流量也更低。以上这些限制因素的综合常常使得取样不可能进行。

12. 钻井过程中泥浆滤液侵入井壁在井筒周围的地层中形成正压时就会出现超压。在预测试过程中利用 WFT 进行的压力测试受这一正压的影响，此时压力大于地层真实的压力。



▲ 压降和流量的比较。埃尼集团的工程师选择使用 Saturn 探针在流量为 45 mD/cP 的储层收集样品，并使用 XLD 单探针在同一口井中流量更高（880 mD/cP）的储层收集样品。流过 Saturn 探针（左）的流量（上，绿色线）几乎是 XLD 探针流量（右）的两倍，但压降（蓝色线）仅是 XLD 探针的一半。清洁过程中的荧光检测（中）指示荧光随着流体纯净度而增加时的清洁程度。利用 Saturn 探针进行测试的储层用了 10 分钟达到纯净度要求（左下），而 XLD 探针达到纯净度要求用了 30 分钟（右下）。

Quicksilver Probe 的仪器设计缩短了测点上的测量时间，DFA 技术为工程师提供了有关储层流体的关键和及时的信息。以上两方面的技术进展不仅使作业者能够更快地采集压力和流体样品数据，而且对测量结果的精度有更大的信心。

Saturn 探针的推出扩大了 WFT 技术的应用范围，其中包括低渗透率或未固结地层、稠油、近临界流体以及粗糙井眼等。Saturn 探针的取样入口形成的总流动面积比最大的常规单探针地层测试器的入口要大 1200% 以上。

这一较大的面积意味着粘性流体的流动受到的阻碍更小，所需压差降低。而粘性流体流动以及压差等正是以前某些环境下进行测试的限制因素。

除了使作业者能够在这些地层中进行测量和取样外，在大多数情况下 Saturn 探针还能更快速处理泥浆滤液和受污染的地层流体，从而缩短了在测点上停留的时间。对低流量储层进行的恒定压降模拟结果表明，与标准 XLD 封隔器探针相比，Saturn 仪器完成流体清洁所用时间要快几个数量级。由于不存在存储体积，能够更早地识

别瞬变流动范围，从而进一步拓展了层段压力瞬变测试的应用范围。

缩短作业时间对当今的一些项目而言十分重要，因为这些项目的作业成本常常超过 100 万美元/日。Saturn 探针通过较高的流量解决了高成本时间的问题，为作业者节省数小时甚至数天的作业费用。同样，Saturn 探针采集的数据能够使工程师根据真实数据而非估算结果进行关键的完井和开采决策。

—RvF