

# 井下油气分析

现在人们可以通过一种新型流体采样器对油气流体组分进行快速评价，能够在样品装满采样容器前，确定这些为后期分析采集的样品品质。这种仪器能够非常灵敏地确定地层内组分变化的梯度。

Soraya Betancourt  
Go Fujisawa  
Oliver C. Mullins  
美国康涅狄格州 Ridgefield

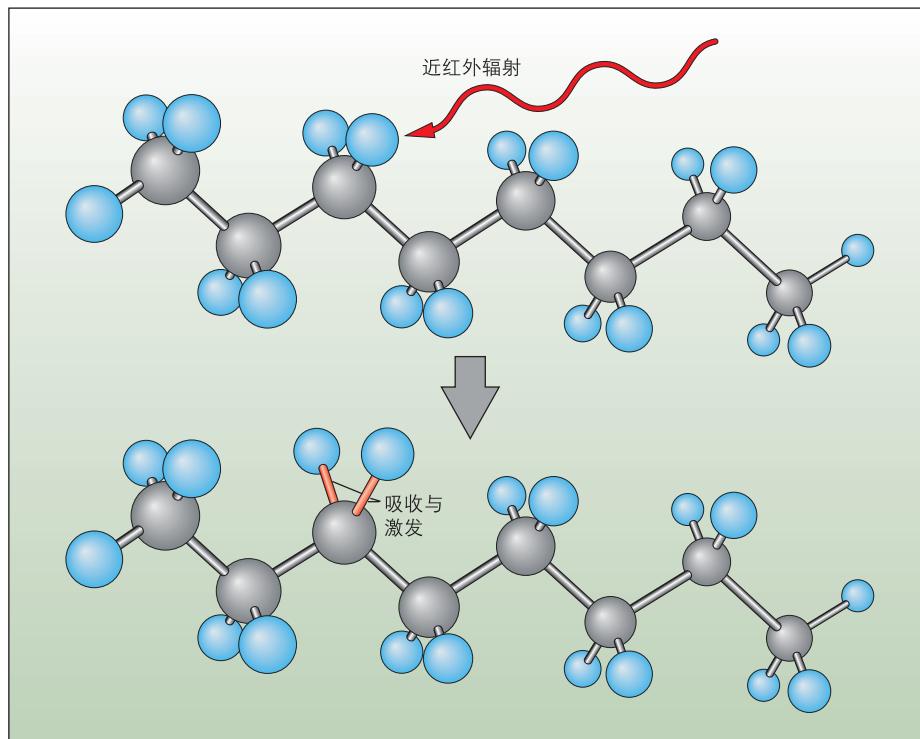
Andrew Carnegie  
阿联酋 (UAE) 阿布扎比

Chengli Dong  
Andrew Kurkjian  
美国得克萨斯州 Sugar Land

Kare Otto Eriksen  
挪威国家石油公司  
挪威斯塔万格

Mostafa Haggag  
Antonio R. Jaramillo  
阿布扎比陆上石油作业公司  
阿联酋阿布扎比

Harry Terabayashi  
日本神奈川县 Fuchinobe



CFA (流体成分分析仪), LFA (MDT仪器使用的含气流体分析仪), MDT (模块式地层动态测试仪) 和 PVT Express 等是斯伦贝谢公司的商标。

在编写本文过程中得到以下人员的帮助，谨表谢意：加拿大艾伯塔省埃德蒙顿的 Sylvain Jayawardane 和 Jiasen Tan; 美国得克萨斯州 Rosharon 的 Sudhir Pai; 阿联酋阿布扎比的 Ibrahim Shawky; 以及日本神奈川县 Fuchinobe 的 Tsutomu Yamate。

在开发阶段早期了解原油的成分，能够帮助优化资源的开采。现在，这种信息能够利用一种电缆仪器获得，这种仪器实时提供的结果能够在现场成分测量的基础上实现流体采样过程的最优化。

天然气组分和气/油比 (GOR) 的早期确定方法，是决定是否完井，甚至是

否开发整个油田所必需的。例如，经济有效地开发那些富含气态烃的储层和那些气体中二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ) 比例很高的储层是完全不同的。 $\text{CO}_2$  具有很强的腐蚀性，所以它的存在将会改变对采气管线和地面设备的要求。

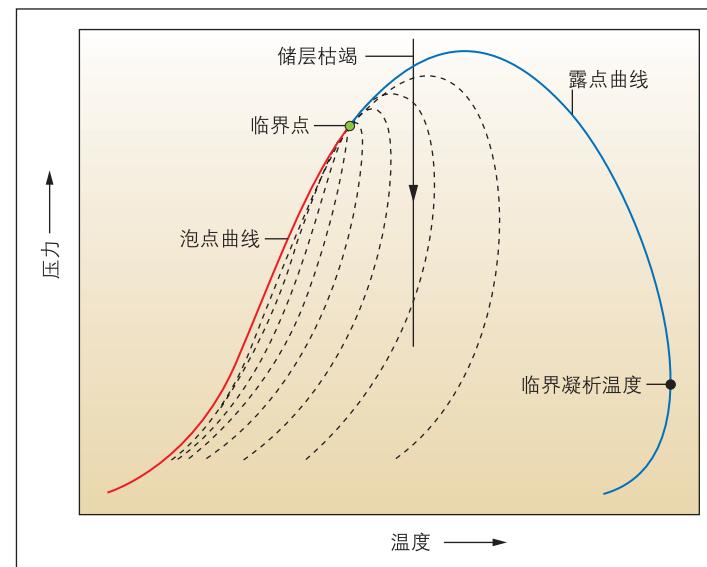
此外,可能需要避免组分不相容的圈闭进行混采,采气管线上堆积的沥青、蜡、水合物和有机垢等产生的问题,也会影响流动特性<sup>[1]</sup>。这些流体组分可能会限制允许的生产压差和流量,阻止流体外流。

本文介绍了MDT模块式地层动态测试仪中流体分析的最新进展<sup>[2]</sup>。一种新型模块式仪器CFA流体组分分析仪,能够直接提供地层样品的流体组分测量结果,识别出样品中的甲烷、轻质烃、重质烃、二氧化碳和水分等。这种仪器以各种流体的光吸收和荧光分析为基础获得确定结果;这些结果将被实时传输到地面。文中将利用中东和北海的实例说明这种新型模块式仪器的有效性。

## 油气分析

石油和天然气等术语都是描述烃类状态的(液态或气态),而不是指具体的化学成分。碳氢成分的详细测量结果,如地面实验室确定的结果,可以用来预测各种温度和压力条件下的气相和油相成分,以及其它类似密度和粘度等物理特征。这些详细的实验室测量结果可能需要花费很长时间来获取。这种新型CFA仪器连同MDT装置上其它模块一起,提供了某些成分的一种快速确定方法,而且能够在提取样品做进一步分析前,显示出钻井泥浆的污染程度。

碳氢流体由许多组分构成,包括单个碳原子的甲烷到长链碳化合物,以及环族、芳香族和其它复杂分子结构的成分,如沥青质和蜡等。这些组分确定了某一特定储层流体的相特征,这种特征通常采用压力-体积-温度(PVT)相态图显示(右上图)<sup>[3]</sup>。如果压力和温度在相包络图范围以外,则碳氢流体保持单相流状态,如果在相包络图范围内包含的条件下,则同时存在两相流,但在这两种两相流共存的区域里,相成分发生了变化。在靠近泡点曲线的区域,气相流以甲烷为主,但在逐步进入两相流区域过程中,气相流中开始出现多种轻质和中质成分。



> 反凝析气藏的碳氢相流包络图。在泡点与露点曲线之间,碳氢流体为两相流状态。特定液态摩尔克分子的各条曲线(虚线)在临界点相汇。进入两相流区域到临界点右侧的流体称为反凝析流体。温度高于临界凝析温度的流体会在各种压力条件下保持单相流状态。如果温度和压力等储层初始条件超过相包络线,且位于临界温度与临界凝析温度之间,则流体将经过露点,而且随着储层压力下降,液体会从气相流体中析出。这种状态(垂直线)从储层初始条件开始,这里显示在任意选择的温度和压力上。

同样道理,经过露点后首先析出的液体是重质成分,较轻的成分则在进一步进入露点曲线所包含的条件下形成液流相状态。在对凝析气流体进行采样时,这种现象非常重要:一旦某种流体进入两相流区域,重质成分首先变成液流相。在CFA设计中使用了这种特性,以便确定流体何时经过露点。

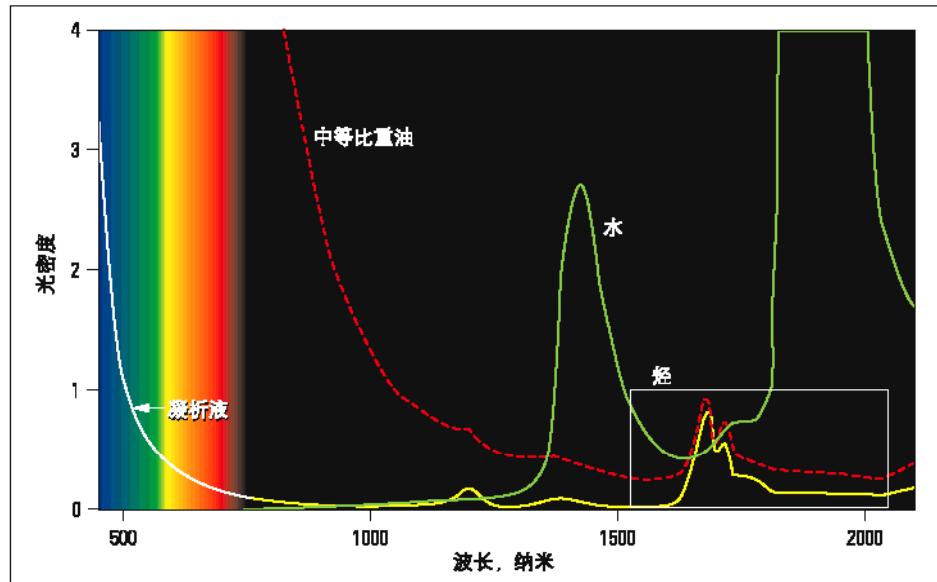
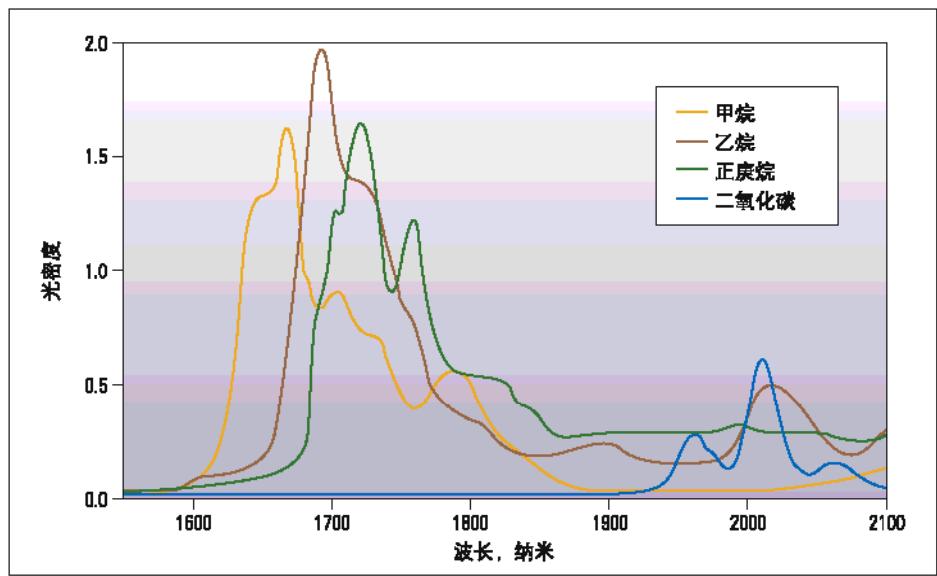
在泡点和露点相汇处的压力和温度条件称为临界点条件。在这一点上,液相流和气相流的密度与成分是相同的,两相流共存时的最高温度称为临界凝析温度。

通常,储层温度是不变的—除非向储层注入冷或热流体—所以大多数正在枯竭的储层在压力和温度的相态图上遵循一条向下的垂直曲线。如果储层温度位于临界温度与临界凝析温度之间,则液体会从储层内的气相流中析出,这类储层被称为凝析气或反凝析储层。温度高于临界凝析温度的储层所含的气体,当由于压力和温度

下降导致有液体从生产系统中析出时,称为湿气,或者当储层或生产系统中没有液体析出时,称为干气。

勘探项目中的早期经济决策,通常取决于对储层内所含烃类型的描述。这种确定方法对海上勘探项目特别重要,因为那里可能需要设计非常昂贵的生产平台设施或海底回接装置,以便处理储层所含的流体。在一些边远地区也需要尽早确定烃的类型,这些地区的卫星油田可能无法经济有效地进行生产,除非建造回接组合系统或其它设施来销售天然气。

- Wasden FK:“Flow Assurance in Deepwater Flowlines/Pipelines,” Deepwater Technology, *World Oil* 杂志增刊 (2003年10月): 35-38.
- Andrews RJ, Beck G, Castelijns K, Chen A, Cribbs ME, Fadnes FH, Irvine-Fortescue J, Williams S, Hashem M, Jamaluddin A, Kurkjian A, Sass B, Mullins OC, Rylander E 和 Van Dusen: “利用原油和凝析油的颜色定量测定污染程度,”《油田新技术》, 13卷, 第3期 (2001年秋季刊): 24-43.
- 关于相图和拟流体更多的信息,请参见:Afilaka JO, Bahamaish J, Bowen G, Bratvedt K, Holmes JA, Miller T, Fjerstad P, Grinstaff G, Jalali Y, Lucas C, Jimenez Z, Lolumari T, May E 和 Randall E:“油藏模拟的逐步完善,”一文中的“构建拟流体”,《油田新技术》, 13卷, 第1期 (2001年春季): 44-45。



可见光和近红外吸收光谱。随着波长的增加，烃的光密度或光吸收谱是随逐渐加重和复杂化的分子变化的（下）。凝析气和油在可见光区域内有不同的响应。烃分子扰动带出现在1700纳米附近，在那里光激发烃键，会导致分子振动（上）。甲烷会产生 $\text{CH}_4$ 振动模式的脉冲，而乙烷出现 $-\text{CH}_3$ 模式的脉冲。正庚烷等长链烃有多个 $-\text{CH}_2-$ 键，但在链的末端也有 $-\text{CH}_3$ 键。二氧化碳的激发波长比烃激发波长要长。水有两个很强、很宽的吸收脉冲，可能会干扰烃激发脉冲的检测（下）。

常规生产措施也需要了解流体的相流特性。如果储层压力降至露点以下，凝析液析出地层。在低饱和度情况下，孔隙空间中的液体是静止的，且降低了气体相对渗透率，因而产生两个不利的结果：生产能力下降和有价值的凝析液滞留在储层中。通常，需要通过注入气体或水提供压力支持，以便确保储层压力在露点以上。同样，采用类似的措施可以确保油藏压力在泡点以上，以便

避免气体析出。混相驱程序，例如重新注入各种经过分离器的气体，可以改变地层与注入流体整个混合体的组分和相流特性。提取储层流体样品也是了解这一过程所必需的。

### 流体采样

多年来，我们行业一直通过从地层中采集样品送到地面，并在可能远离井场的实验室进行分析的方式评价流

体。这个过程相当花费时间，而且极易在采集、处理或运输期间的样品降解过程中出现错误。

PVT Express 现场井液分析服务系统是流体特性确定技术的一项最新进展。该系统可以在样品到达地面后几个小时内产生详细的流体分析数据。一种专门用来确定 PVT 特性的微型系统，能够对凝析气样品进行现场露点压力测量。这种小型模块化可移动实验装置可以运送到世界各个地方，能够消除样品装运延误的时间，不仅能够确定流体质量和流体特性，而且还保留了获得其它样品的机会。采用 PVT Express 服务系统能够更快速地制定实施其它电缆地层测试或钻杆测试作业的决策。

斯伦贝谢的下一步工作是着手在井下进行一些流体特性的评价。MDT 仪器使用的 LFA 含气流体分析仪，提供了一种现场流体分析方法，以便确定何时钻井泥浆污染下降到足以获得有效质量的样品的程度<sup>[4]</sup>。这种方法能够削减采集流体样品所需的时间，降低钻机成本以及因为仪器深入地层过长而出现被卡住的风险。

LFA 模块包含一个专门用来记录甲烷存在的记录道，提供获得 GOR 数据的方法<sup>[5]</sup>。井下 GOR 测量结果能够帮助识别不同地层是否被分隔。采样程序可以直接显示指定间隔内的成分变量，帮助完善完井程序。井下、井场和实验室原油特性测量结果之间吻合程度构成了导出流体特性的置信程度。

LFA 记录道还可以测量原油的颜色，这种颜色通常随冲洗地层的钻井泥浆变化。一种综合算法可以显示出 MDT 采样模块获得有代表性的地层流体样品所需的冲洗时间<sup>[6]</sup>。这种评价方法能够为地面各种分析预先确定流体样品的品质，提供类似 GOR 等基础流体特性数据，以及帮助确定不同深度的流体变化性质。这些测量结果对 MDT 仪器在井下作业期间调整采样和分析程序至关重要，能够帮助作业者实现在一次测量作业中产生最佳效益。

凝析气藏会给流体采样带来一些特殊问题。采样仪器必须利用压差将流体从地层中提取到采样容器里。如果这种压差过大，压力可能会降至露点以下，而且被分离的液相流可能会被截留在气藏内。因此，收集的样品将不具代表性。即使相变过程发生在地层以外，也就是说，仪器探头和采集模块中或采气管线内的流体变成多相流进入采样容器，仪器内流体密度和粘度的差异与相流分离，可能会产生不具代表性的样品组分。气藏流体分解为两相流问题会在钻杆测试期间地面获得样品时变得更加严重，因为这种采样方式要比电缆上的采样仪器使用更大的压差。

由美国康涅狄格州 Ridgefield 的斯伦贝谢道尔研究中心、日本神奈川县 Fuchinobe 的斯伦贝谢 Kabushiki Kaisha 技术中心和美国得克萨斯州 Sugar Land 的斯伦贝谢 Sugar Land 产品中心联合开发的新型 CFA 模块，通过专门设计，采用荧光探测器将露点形成作为辅助碳氢化合物物流相进行检测。这是首台具有露点检测能力的井下仪器。利用这种能力，该模块可以区分单相流与多相流流动间的差异，并能够显示出何时仪器的压力降至露点压力以下。与 IFA 模块配合使用，CFA 仪器能够显示出获得样品的正确时间和条件，即使是在凝析气藏这样困难的环境下。

除荧光探测器外，CFA 仪器还装有吸收光谱探测器，能够在几种波长上测量一种流体的暗度或光密度。这些测量结果可以识别烃流体的几种组分，不仅能够加强露点检测，而且能够提供一种组分分析方法。这种组分分析方法的能力将在本文后面描述荧光检测中首先进行讨论。

## 气体组分评价

CFA 光谱探测器能够采集到烃分子与可见光和近红外光波长的光波相互作用的结果。电子能量谱之间的相互影响使原油着色，而且复杂分子结构吸收的光多于简单分子（[前一页](#)<sup>[1]</sup>）。胶质成分

和沥青质成分多的原油比主要成分为石蜡的原油更暗<sup>[8]</sup>。凝析气颜色相对明亮，电子吸收较少。

在近红外光区域出现一种不同类型的相互影响，在那里光吸收激发分子振动，而且碳 (C) 原子与氢 (H) 原子之间分子键的类型决定着吸收光的振动频率。明显的振动吸收作用出现在三种类型的分子排列中<sup>[9]</sup>：

- 四个氢原子围绕一个碳原子，即  $\text{CH}_4$
- 三个氢原子围绕一个碳原子，即  $-\text{CH}_3$
- 两个氢原子围绕一个碳原子，即  $-\text{CH}_2-$

甲烷是第一种模式的唯一实例，乙烷是第二种情况的一个实例，因为它包含两个碳原子，每个碳原子与三个氢原子连接。然而，长链烃以  $-\text{CH}_2-$  为主，但在链的每端也有一个  $-\text{CH}_3$  基。 $-\text{CH}_2-$  基控制着这类长链化合物的光吸收能力，但也存在一些  $-\text{CH}_3$  吸收现象。例如，正十二烷，即拥有 12 个碳原子组成线性链的普通石蜡，77% 的碳氢键是  $-\text{CH}_2-$  基。烃光谱分析中存在一个复杂问题：吸收光谱重叠问题。光谱解释需要正确考虑这种重叠。CFA 分析通过使用一种主成分回归技术，能够解决这些难题。即使在含振动光谱情况下，这种数学程序也能够从任何数据集中提取大量信息。

CFA 解释算法配合五个探测器能够确定四种成分<sup>[10]</sup>：

- 甲烷，在 CFA 分析中定义为 C1<sup>[11]</sup>
- 其它碳氢气体，定义为 C2-C5
- 碳氢液体，定义为 C6+
- 二氧化碳， $\text{CO}_2$

性质截然不同的光谱特征能够区分甲烷和二氧化碳。其它碳氢气体主要由  $-\text{CH}_3$  控制。而碳氢液体则主要由  $-\text{CH}_2-$  基控制。因此，主成分回归分析结果可以通过光谱特性描述进行解释。

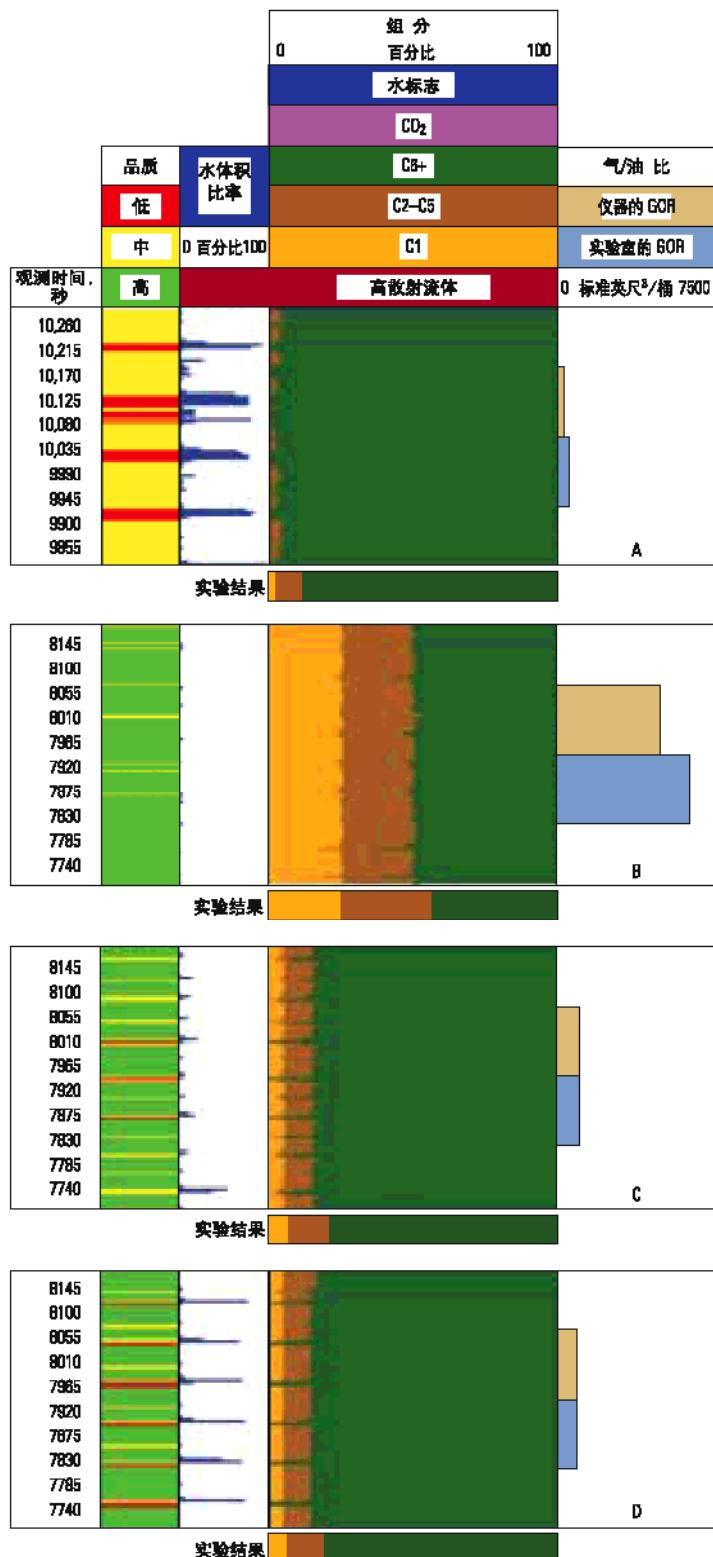
在红外线光谱的相同部分里，水有一个很宽和很强的吸收脉冲。水的存在可能会干扰其它信号，尤其是  $\text{CO}_2$  信号。CFA 模块有一个专门调整到水振动模式

频率上的探测器，能够在其它探测器的响应受到水干扰时进行显示。

由于 GOR 较低的流体拥有一个彩色信号，其强度足以干扰振动模式的吸收脉冲，所以建议 CFA 仪器选择 GOR 超过 1000 标准英尺<sup>3</sup>/桶 (180 米<sup>3</sup>/米<sup>3</sup>) 的流体，这种建议所涉及的流体包括气体、凝析气、挥发油和一些黑油<sup>[12]</sup>。

下面章节将显示这些组分测量结果如何用来检测监测井注入的气体，以及在一个含气顶油藏的油柱内如何发现组分变化梯度。

- 
4. Andrews 等人，参考文献 2。
  5. Mullins OC, Beck GF, Cribbs ME, Terabayashi T 和 Kegasawa K: “Downhole Determination of GOR on Single-Phase Fluids by Optical Spectroscopy,” 第 42 届 SPWLA 测井年会论文集，美国得克萨斯州休斯敦，2001 年 6 月 17-20 日，论文 M。
  6. Dong C, Hegeman PS, Elshahawi H, Mullins OC, Fujisawa G 和 Kurkjian A: “Advances in Downhole Contamination Monitoring and GOR Measurement of Formation Fluid Samples,” 第 44 届 SPWLA 测井年会论文集，美国得克萨斯州 Galveston，2003 年 6 月 22-25 日，论文 FF。
  7. 关于原油可见光和近红外吸收光谱方面更多信息，请参见：Andrews 等人，参考文献 2。
  8. 原油中发现的非碳氢化合物，如那些包含氮、氧和硫的化合物，也对颜色产生影响。黑油可能含有大量这种成分。
  9. 破折号表示与其它碳原子的连接： $-\text{CH}_3$  表示与一个碳原子连接，而  $-\text{CH}_2-$  表示显示的碳原子每边与一个碳原子连接。
  10. Van Agthoven MA, Fujisawa G, Rabbito P 和 Mullins OC: “Near-Infrared Spectral Analysis of Gas Mixtures,” *Applied Spectroscopy*, 56 卷, 第 5 期 (2002 年): 593-598。
  11. 在这门学科的术语中，C 字母后面跟着的数字表示化合物中碳原子的数量，所以 C1 表示甲烷，分子式为  $\text{CH}_4$ 。
  12. 原油类型与 GOR 的标准对应关系是黑油 GOR 低于 2000 标准英尺<sup>3</sup>/桶 (360 米<sup>3</sup>/米<sup>3</sup>)；挥发油从该值到 3300 标准英尺<sup>3</sup>/桶 (594 米<sup>3</sup>/米<sup>3</sup>)；凝析气扩展到 50000 标准英尺<sup>3</sup>/桶 (9006 米<sup>3</sup>/米<sup>3</sup>)；天然气的 GOR 则高于 50000 标准英尺<sup>3</sup>/桶。



在阿联酋某碳酸盐岩油藏里获得的CFA流体组分。CFA结果显示上面的A层未受干扰。第二测点B的各种气成分C1和C2-C5浓度最大，而且气油比(GOR)最高，表明注入的气体已经过该层。有部分注入气体还经过了下面两测点。在实验室对这次记录期间从采集样品上获得的结果进行了分析，验证了CFA模块测量的组分和GOR数值。

## 检测注入气体

在阿联酋(UAE)陆上碳酸盐岩油藏的一项实施多年的先导注气项目中使用了CFA模块。作为实施评价计划的组成部分，担任作业公司的阿布扎比陆上石油作业公司(ADCO)钻了一口监测井，以便确定注入气体的进展情况<sup>[13]</sup>。装有CFA仪器的MDT采样管柱配了一个双管封隔器模块、一个抽取模块、一个LFA模块和18个单相流多道样品容器。从6个站点获得了足够数量的单相流样品，以备后面的实验室详细分析使用。

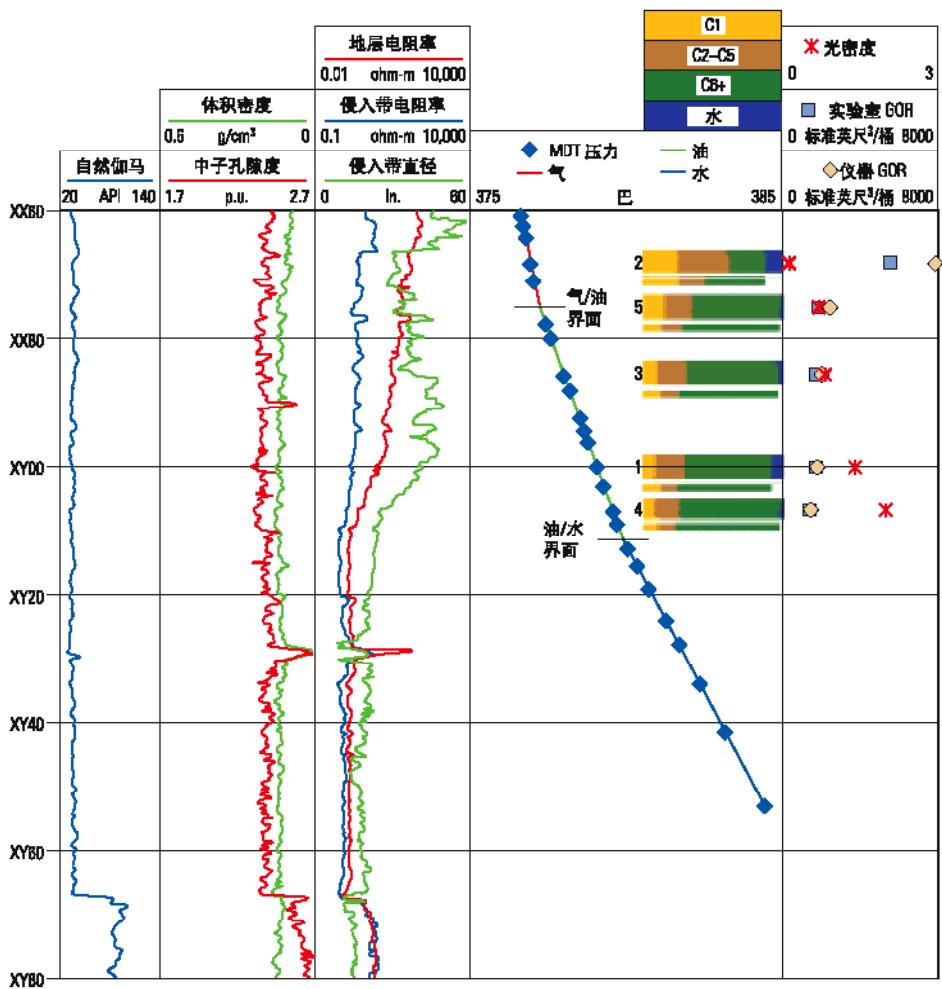
在前4个站点采集样品前，CFA仪器提供了流体组分信息。钻井液采用水基泥浆，所以在分析过程中检测到水。抽取模块的作用将在第60页“多相流环境检测”一章中描述—使水经CFA窗口的液体段塞。这种仪器能够在采样前检测钻井液的清洗情况。

最上面一个区域的样品实际上都是油(左图)。第二个采样站清楚地显示出地层产生的高浓度气体。下面两个层产生了部分气体。这表明在监测井中，最上面的层未被驱替，而第二个层大部分被注入气体驱替。这些结果说明上面两个层并不连通。

在泵注两个小时清洗钻井泥浆后获得CFA结果。在每个采样站点又经历2到3个小时后，LFA彩色记录上的变化表明，流体已经清除干净，可以用单相流采样容器采集样品。这些样品在实验室进行分析，其结果与实时CFA数据匹配合理。这些结果帮助ADCO了解了他们油田的流动特性和注气效率。

## 发现组分变化梯度

担任挪威海域一口评价井作业公司的挪威国家石油公司，希望确定气/油界面(GOC)和油/水界面(OWC)，以及为实验室分析采集流体样品。在一口发现井中实施的钻杆测试，未能提供最终流体流相特征的数据，而这口井是开发设施开发这种接近临界点的复合油藏流体系统前唯一的评价井。挪威国家石油公司认为获取该油藏流体特性良好的描述结果非常重要。



北海一口井的组分变化梯度。自然伽马（第1道）、体密度与中子孔隙度（第2道）和地层电阻率（第3道）记录显示出一个大约100米（328英尺）厚的基本无特征变化层段。在大约XY30位置上存在一个较薄的、可能是非渗透的层段。侵入带电阻率（第3道）曲线暗示有一个含水层延伸到XY10，一个过渡带约延伸到XY95，而且约三分之一超过XY75。压力测量结果（第4道）证实了位于XY75的气/油界面和位于XY10的油/水界面产生的三个变化梯度。CFA彩色纪录产生的光密度和气/油比（GOR）（第5道）显示出组分中出现的变化梯度，该梯度也能够在CFA组分分析（第4道）结果中看到。CFA组分左侧的数字表示井下采样顺序。每个CFA结果下面的窄条是随后获得的实验室结果，这些结果扣除了CFA仪器测量的含水比率，因而能够直接进行碳氢成分的比较。实验室GOR测量结果（第5道）也证实了该组分梯度，尽管数值与CFA结果有所不同。

除了在XY30米出现的可能为非渗透薄层外（上图）。电缆三组合测井记录显示出100米（328英尺）基本无特征变化的油藏段。密度和中子孔隙度记录没有显示出交会区域。交会区域通常是指含气带的标志，但该油藏的地层和流体特征都没有出现分离的现象，大概是由含气密度高、含油密度低和水基泥浆滤液侵入的缘故。地层电阻率是均匀的，但由于侵入区的水基泥浆，电阻率在水饱和的冲洗带内显示出一个逼真的变化，象位于XY10的OWC。

随后，挪威国家石油公司用MDT仪器在地层中获得了压力变化梯度，以便

找出不同的流体剖面。MDT记录系统由一个探头模块、一个抽取模块、一个CFA模块、一个LFA模块和多个采样容器模块组成。探头模块有一个高级石英压力计。

在电缆测井资料识别的100米层段内，作业公司获得了25个压力测量结果。这些数据确定了与油、气、水有关的三个压力变化梯度，它们彼此间存在水动力连通。然而，仅仅依赖压力变化梯度不足以分辨含烃层段的组分变化梯度。挪威国家石油公司在世界其它地方对组分等级进行了研究，并计划对该油柱进行更详细的研究<sup>[14]</sup>。

一旦获得了压力测量结果，作业公司对下井仪器串进行重新定位，以便用CFA模块分析地层流体，以及在油柱下部区域用高压采样瓶采集样品。这种CFA模块能够在填满每个采样容器前获得样品组分的快速读数。实时传递到地面的结果表明，流体组分在1000~2000秒（即17~33分钟）时间内保持稳定。CFA组分测量结果通常在1个小时的清洗时间后提取。然而，水基泥浆的段塞会继续穿过这种仪器，而且为使泥浆污染程度降至采集的每个样品符合地面分析要求，通常要再花费两个多小时的时间。

随后，将探头定位在气顶位置上。此时，GOR很高，C1和C2-C5组分的浓度很大。彩色记录上的光密度在气顶处几乎为零，与存在轻烃系统相符。

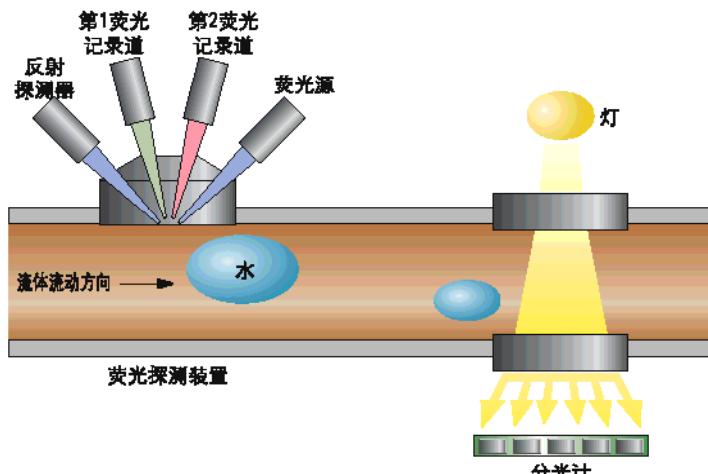
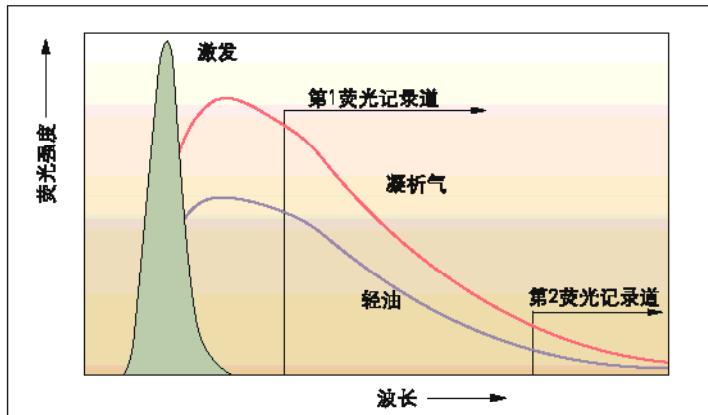
在气顶获得流体样品后，重新确定仪器位置，以便在第一个油样上面14米（46英尺）处获得第二个样品。作业公司认为在该含油层段内可能存在一个组分变化梯度。从两个油样采集点获得的CFA结果表明，上采样点存在很高的GOR。同时，上采样点的彩色光密度也有所下降，表明上面含气量很高。

根据这种信息，作业公司可以立刻改变测井计划，将探头模块尽可能地靠近油/水界面，然后再靠近气/油界面。覆盖整个油柱范围的CFA读数证实了流体组分变化梯度的存在，而且油柱内32米（105英尺）范围上的GOR增幅超过60%。在这些点上采集的流体样品及随后在实验室进行的分析都证实存在一个组分变化梯度。

13. Fujisawa G, Mullins OC, Dong C, Carnegie A, Betancourt SS, Terabayashi T, Yoshida S, Jaramillo AR 和 Haggag M: "Analyzing Reservoir Fluid Composition In-Situ in Real Time: Case Study in a Carbonate Reservoir," SPE 84092, 发表在SPE技术年会暨展览会上，美国科罗拉多州丹佛，2003年10月5-8日。

14. Hoier L 和 Whitson CH: "Compositional Grading Theory and Practice," SPE 63085, 发表在SPE技术年会暨展览会上，美国得克萨斯州达拉斯，2000年10月1-4日。

关于另一个组分变化梯度的实例，请参见：Metcalfe RS, Vogel JL 和 Morris RW: "Compositional Gradients in the Anschutz Ranch East Field," SPE 14412, SPE Reservoir Engineering, 3卷, 第3期 (1988年8月):1025-1032。



▲ 荧光谱探测。CFA 流线装置上的荧光探测器和分光计间隔约 7 厘米 (3 英寸) (下)。在整个荧光探测装置上, 荧光源从样品窗口反射到调整为相同波长的探测记录道上。激励光束随波长延长再次激发, 调整另外两个记录道在两个波长分布范围内探测这种碳氢化合物的荧光。凝析液产生的大多数信号出现在两个探测器中的第一个探测器上 (上)。

如果没有实时 CFA 分析手段, 就不可能发现这个变化梯度。首先, 在实验室内, 样品间的细小差别通常被解释为采样难度的变化, 而不是流体特性的变化。其次, 在没有任何先验证据表明存在变化梯度的情况下, 任何一家公司都不可能在这种油柱高度范围内设置 4 个独立的采样点。

对于挪威国家石油公司来说, 注意到油柱上存在一个组分变化梯度并实时证实了这个结论是最重要的。这使作业公司能够调整 MDT 采样计划, 以便确认合适的流体采样深度和为整个油藏流体描述采集到足够数量的样品。了解到地层内存在一个组分变化梯度, 以及了解

GOR 可能出现的变化范围, 能够帮助该公司采取一种井下降压措施, 以便优化生产。

由于作业公司计划采用水平井开发该油田, 所以根据气/油界面和水/油界面部署井位非常关键。在这次系列测试期间实施的 MDT 渗透率测试, 为布井提供了辅助信息。

由 CFA 和 LFA 模块组合提供的现场特性确定结果肯定了采样容器获得的样品质量。由于该油田的产出液将与其它油田有联系, 所以量化的流体组分分析和与其它流体配伍情况的确定结果, 对于保障适当的流动特性是非常重要的。

如果经过探测器的流体分解为两相

流, 组分中的细微变化很可能不易察觉。如果压差过大, 就很可能出现这种情况。因此, 当流体经过它的露点流动时, 使用荧光进行检测很关键。

### 芳香族的光惰性

芳香烃会发光。识别荧光谱特性的方法是在光吸收与再次发射之间存在短暂的时间延迟, 以及再次发射的能量较低—即波长比吸收光更长 (左图)<sup>[15]</sup>。

CFA 模块沿采气管线配备了一个荧光检测单元 (FDU), 大约距吸收光分光计 7 厘米 (3 英寸)。由于它们紧密相连, 所以两种探测器基本上采集到相同的流体, 这样使两种测量结果能够同时用来评价流体。

FDU 将荧光照射在流管的一个窗口上, 将一个调整到光源波长的探测器部署到反射位置上, 以便提供光直接反射结果, 减少出现虚假荧光检测结果的可能性。FDU 上其它两个探测器将记录荧光的光谱和强度。

FDU 对流体出现在流管窗口表面上的荧光非常敏感。露点的形成经常会使液体覆盖在流管表面上, 当流体为单相流状态时, 探测器能够检测到窗口附近流动的流体特性。一旦压力低于露点压力, 会溶解和凝析出液体。凝析液相流会湿润探测器的窗口, 所以荧光探测器必须对液相流特性非常敏感。因为液相流中富含重质尾馏成分, FDU 要对出现凝析气分离的液相流现象敏感, 这使得它成为探测低于露点的流体何时分离的理想仪器。

### 多相流环境检测

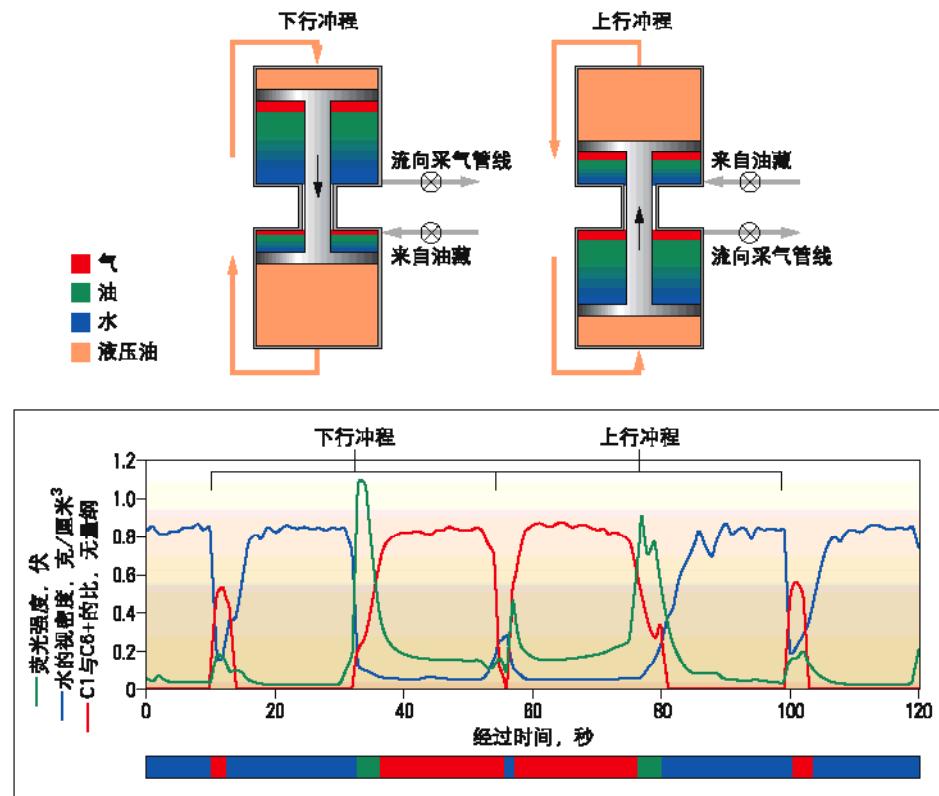
现场 FDU 的首次使用结果表明, 在采样点使用的生产压差过大, 产生了两相流环境。作业公司将仪器移动到几厘米以外的另一个位置上, 并重新采样, 从而获得了良好的采样结果。本节描述了流体在抽取模块中如何分离, 以及 FDU 如何检测第一个采样点压差过大造成的这种两相流环境。

在 MDT 测井记录期间，将探头插入地层，随后用泵将流体从地层内抽取到仪器中。理想的条件是压差能够达到从地层中取出流体的要求，但不能让流体压力低于其露点压力太多。然而，在大多数探井开始进行 MDT 作业前，无法掌握或清楚地掌握地层渗透率和露点压力与地层压力之间的差异。事实上，确定露点是获取流体样品的主要原因之一。不掌握渗透率和露点压力，建立保存单相流气体的准确生产压差是很困难的。CFA 仪器上的 FDU 能够提供这种现场环境的检测结果。

当水可能出现在采气管线里时，CFA 单元应该部署在抽取模块后面，以便避免很强的水吸收脉冲连续干扰长波长吸收光分光计的结果。虽然水仍然会出现在采用这种排列方式的采气管线里，但泵工作上的滞留时间能够保证相流分离，因此水、油和气体将分别经过分光计（右图）。在实施下行冲程时，泵的下部从地层中获得流体，而上部将流体排放到来气管线里，排放口位于泵的上空腔底部，所以首先抽出的流体是水，其次是油，最后是气体。在实施上行冲程时，泵空腔的工作原理相反。此时，虽然下空腔向采气管线排放流体，但上空腔的排放顺序不同，首先排放的是气体，其次是油，最后是水。

利用水和烃振动能量吸收脉冲和主 FDU 荧光记录，CFA 仪器能够很清晰地鉴别出流相。当 C1 与 C6 的比值很高时，烃的振动记录能够提供经过采气管线的气体流量的显示。FDU 对存在烃液相流非常敏感，所以三个数值—水吸收、C1/C6 和主荧光记录的曲线图一显示出流过采气管线的三种流相。

15. 发射光子是分子从激励状态衰变的一种方式。如果耗散了一些激励能量，如通过碰撞，再次发射的光的能量低于吸收能量。



▲ 北海某井中抽取模块的多相流顺流检测。这种抽取模块是一个活塞泵，拥有两个分离的、共用一个活塞的空腔。当抽取模块执行向下冲程时（左上），一个组合阀直接将地层流体送入下面的空腔，并通过上面的空腔送入采气管线，而在执行上行冲程时，组合阀会转换进出口的方向（右上）。位于该泵后面的 CFA 模块将检测三个方面的数据。曲线图（中）将比较水振动记录、显示轻油的荧光记录和显示气体的 C1/C6+ 比等产生的信号。在下行冲程时，水首先排出，随后是油，最后是气体（假设都存在，且在空腔内）。在上行冲程时，排出的顺序相反。彩色条码显示出主要流动成分（下）。该流体样品来自一个凝析气层段，流体分离为液相流和气相流的现象表明该层段的压差过大。

该程序显示出北海一口井气顶采样期间三相流的情况。在该实例中，作业公司推测气顶可能包含反凝析气。该气体近似饱和状态，而且抽取单元使压力低于地层压力 25 巴 (370 psi)。由于使用大压差从地层中抽取流体，所以观察到烃的两相流；从这种深度获得的样品将是无效的，因为这里出现地层流体伤害的几率很高。在将 MDT 管柱移动几厘米获得未受影响的样品后，作业公司发现新的样品所含液体多于首次获得的样品。根据实时 CFA 采集结果，公司可以对不适当的采样环境进行了检测，并将仪器移动到新的位置上。

## 实时分析的优点

FDU 提供的各项功能与实时 CFA 服务相结合，加强了流相过渡环境检测的灵敏度，并提供了有关流体组分的额外信息。

从重质烃中鉴别出甲烷和轻质烃的能力，明显增加了凝析气藏实时采集的信息量。这种确定方法使作业公司能够快速制定重要的油藏开发经济决策。随后，利用优质样品—使用这些创新的井下采样仪器，在采集前保证样品的质量，作业公司能够在地面实验室进行更广泛的测试。

— MAA