

岩心实验—地层评价的基石

地下勘探的性质迫使油气公司主要通过测井、地震勘探和试井等方式对各油藏进行远程勘测。通过对井下获取的岩样进行分析，岩心实验室提供了关于岩性、孔隙度、渗透率、流体饱和度及其它特性的大量信息，帮助作业者更好地描述油藏的复杂性质。

Mark A. Andersen

Brent Duncan

Ryan McLin

美国，德克萨斯，休斯顿

《油田新技术》2013年夏季刊：25卷，第2期。

©2013斯伦贝谢版权所有。

向协助撰写本文的各位致谢：Angela Dippold Beeson, David Harrison, Mario Roberto Rojas和Leslie Zhang, 休斯顿；Carlos Chaparro和Adriano Lobo, 哥伦比亚国家石油公司，哥伦比亚，波哥塔；Alyssa Charsky, Michael Herron和Josephine Mawutor Ndinyah, 美国，马萨诸塞州，剑桥；William W. Clopine, 康菲石油公司，休斯顿；Rudolf Hartmann, BüCHI Labortechnik AG, 瑞士，弗拉维尔；Thaer Gheneim Herrera, 哥伦比亚，波哥塔；Wendy Hinton, Himanshu Kumar和David R. Spain, 英国石油公司，休斯顿；Upul Samarasingha, 美国，犹他州，盐湖城；Tony Smithson, 美国，阿拉巴马，北港；以及Elias Yabrudy, 岩心实验系统公司，美国，加利福尼亚，摩根希尔。

Techlog, TerraTek和XL-Rock是斯伦贝谢的标志。PHI-220氦孔隙度仪是美国岩心实验系统公司的标志。

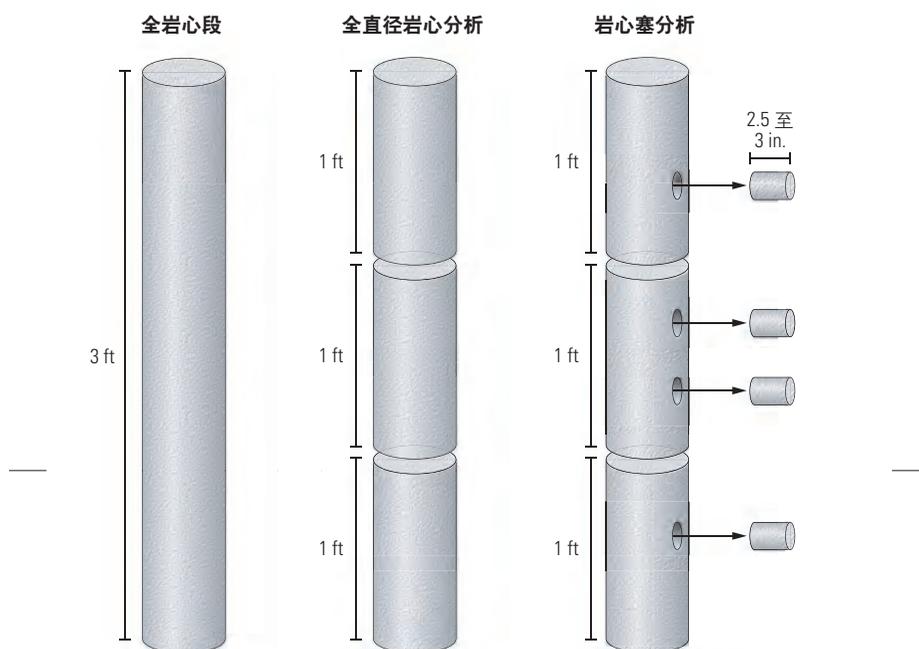
LECO是力可公司的标志。

岩心可为油气藏的勘探、评价与开发提供重要数据。这些岩样使地质学家能够第一手地研究钻头穿透的沉积层序。岩心岩样提供了油气存在、分布与产能的直接证据并可显示仅靠井下测量所无法探测的油藏特性变化。通过对岩心样品的孔隙度、渗透率及流体饱和度的测量与分析，作业者可以更好地把握岩石中孔隙系统的特点并准确地模拟油藏属性，优化生产。

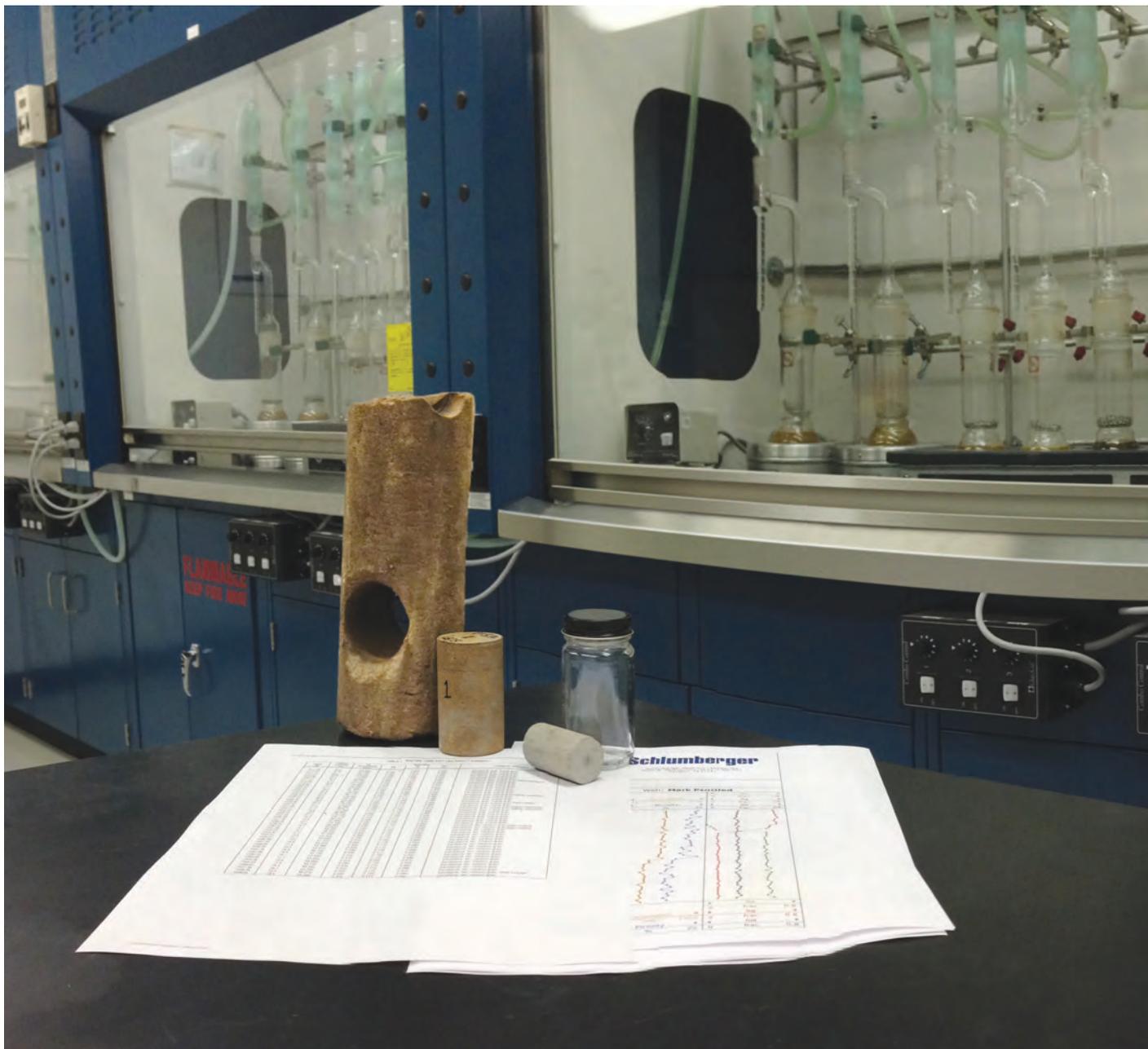
岩心分析对于确定岩石基质特征意义重大，是地层属性描述的重要信

息来源。常规岩心分析技术帮助地质学家们评价地层的孔隙度、渗透率、流体饱和度、颗粒密度、岩性及结构。常规岩心分析实验室（RCALs）经常提供各种各样的附加服务，例如用于将岩心深度与井眼测井深度相关联的岩心伽马测井，用于描述岩石非均质性的岩心计算机截面（CT）扫描以及用于记录描述岩心的岩心照片。

当作业者需要理解复杂的油藏属性时，他们借助特殊岩心分析来对具体特性进行详细测量。特殊岩心分析实验室（SCALs）通常配有测量毛



▲ 分割岩心。在井场，全岩心通常被切割分成尺寸较小的岩心段，以方便运输。在实验室中，可以切割全岩心段并取子样。



细管压力、相对渗透率、核磁共振（NMR）弛豫时间、采收率、湿润性以及其他用于测井数据标定的参数的各种设备。特殊岩心分析实验室的服务也用于描述油藏特征，以提高原油采收率，研究多相流以及流体—岩石相互作用。针对这些大量实验仅选择了少数样品，部分实验需要数周时间完成。

多年来，斯伦贝谢维持着一定数量的岩心分析实验室，以支持对电缆工具响应、钻井液化学、地层损害、提高原油采收率或完井技术的研

究。但是，这些实验室并不提供商业层面的岩心分析服务。直到最近，公司才在美国犹他州盐湖城建立了提供商业岩心分析服务的实验中心，其中TerraTek岩石力学与岩心分析实验室以专注于岩石力学与非常规油藏研究而闻名。2012年斯伦贝谢油藏实验室创建开启了将岩石特性测量技术与流体性质分析相结合的道路，帮助客户更好地理解油藏动态的道路。现在斯伦贝谢通过全球27家实验室提供岩石与流体分析服务。

几家公司提供类似的常规岩心分

析服务。本文重点介绍专家们在休斯顿斯伦贝谢油藏实验室开展的常规砂岩与碳酸盐岩心常规分析。

样品尺寸

岩心样品以各种长度和直径进入实验室（前页）。从岩心中提取的信息部分取决于岩心的大小和数量，因为岩心的尺寸与数量控制着可以开展的分析的类型的。为了满足客户需求，岩心分析实验室必须具备足够的灵活性，能够处理从井场寄送的各类岩心，无论是井底岩心还是井壁岩心。

井底岩心，也被称为全岩心或常规岩心，在钻井过程中使用特殊取芯钻头（下图）获取。岩心直径范围一般在4.45至13.3cm【1.75至5.25 in.】，通常以10-m【30-ft】（与岩心筒或内岩心筒的长度相应）的增量进尺钻取。常规钻头的设计是将钻头面的岩石磨掉，而圆环形取芯钻头可钻出圆柱状岩石，岩石圆柱穿过钻头中心，卡入保护性岩心筒内。

当岩心筒挤满时，司钻将取芯钻具组合从井眼中起出，井场取芯专家将内岩心筒甩出放在钻杆架上。内岩心筒（岩心在筒内）上被标出深度标记和标定线。为了方便运输，金属内筒通常被切割成长度为1-m【3-ft】的小段，每段两端进行密封。同时为了防止运输过程中岩心滑动，井场岩心处理人员可向筒内注入环氧树脂或泡沫固定岩心。

对于井壁岩心（SWCs），取芯过程要简单许多。井壁岩心通过电缆取样装置获取，电缆取样器一般在裸

眼井电缆测井作业即将结束时，在作业者查阅测井记录、确定有利于取样的井段之后下入井中。

井壁岩心取芯工具可在选定深度上从井眼井壁取到90个岩心样品。送达地面之后，井壁岩心被从工具中取出，放入单独的岩心瓶中并密封，然后运送至实验室进行分析。

冲击式取样器能够获取长度在2.86至4.45cm【1.125至1.75 in.】范围、直径在1.75至2.54cm【0.688至1 in.】之间的井壁岩心。冲击取样器被称为取芯枪，使用小型爆炸火药将作为子弹的各个岩心筒推入地层中。取芯筒使用结实的钢丝绳连接到取芯枪上，从井口卷起取芯枪时，利用钢丝绳将取芯弹筒从井壁上拉出。相比之下，旋转岩心使用微型水平定向取芯钻头从地层中切下。XL-Rock大容积旋转井壁取芯工具可以从井眼井壁钻取长度为6.4cm【2.5 in.】外径为3.8cm【1.5 in.】的岩心。这种工具获取的岩心样品的体积超过冲击式井壁岩心体积的三

倍。

第三类岩样为岩心塞。岩心塞从全岩心段上提取，作为全岩心的代表性子样，用作分析岩心相对均质的井段。

常规储层岩心塞通常沿着岩心长度方向以0.3-m【1-ft】的间隔提取，长约6.4cm，直径2.54cm或3.8cm。岩性变化可能要求缩小采样间隔，但是如果岩心高度非均质，如多孔碳酸盐岩、裂隙性碳酸盐岩或薄层砂泥岩中见到的，作业者可以选择对全岩心进行分析而不分析岩心塞。

初步处理

常规岩心分析的基本流程从岩样接收转移到初步成像，然后到准备工作和岩样分析。各个过程都涉及几个步骤。全岩心一般比井壁岩心需要更多的初步处理。虽然常规岩心分析提供了一套标准测量，但并不是所有岩心都要经过本文描述的整个流程。

在试验室中，岩心样品被收入并登记。全岩心被装入能够测量岩心自然发出的伽马射线的岩心伽马射线测量仪。通过将岩心伽马射线测量结果与随钻测井或电缆伽马射线测井数据对比，地质学家可以关联岩心深度与测井深度之间的关系，并确定岩心可能被丢失或损坏的井段。

岩心伽马射线测量仪器利用传送器移动岩心—暴露的岩心或者密封在内筒中的岩心—穿过一个伽马射线探测器。探测器沿着岩心长度方向从底到顶对岩心进行扫描，复制了在电缆测井中采用的测井顺序。



▲ 取芯钻头。图中聚晶金刚石复合片钻头采用了固定牙轮设计，可以保持不触碰井孔中心。该钻头可以钻出一个圆柱状地层芯，岩心穿过钻头中央后被夹持在井下钻具组合中。

- 1 关于 CT 扫描油田应用的更多信息：Kayser A, Knackstedt M 和 Ziauddin M：“孔隙几何形态近距离研究” 油田新技术 18 号（2006 春季刊）：4-13。
2. Passey QR, Dahlberg KE, Sullivan KB, Yin H, Brackett RA, Xiao YH 和 Guzmán-García AG：“薄层储层岩心数字成像”，Dahlberg KE (ed)：薄层碎屑岩储层中含烃孔隙厚度的岩石物理评价。塔尔萨：美国石油地质学家协会，美国石油地质学家协会阿尔奇系列，1 号（2006 年 6 月 30 日）：90-107。
3. Perarnau A：“岩石物理分析中岩心照片数据的应用”，SPWLA 第 52 届测井专题年会论文集，美国，科罗拉多，科罗拉多斯普林斯，2011 年 5 月 14 日-18 日，论文 Z。

下一步是将岩心装入计算机断层扫描仪中，获取CT扫描图像。CT设备可以获取全岩心的三维图像，提取一系列间距紧密的扫描图像，这些图像可以在任意点或方位切片制作虚拟岩心板。CT扫描仪可以穿过岩心进行快速扫描。当发现重点区域时，可以重新扫描重点区，进行详细检测研究（下页）。CT扫描对于层理面、孔洞、化石和裂隙等内部特征的探测与评价尤其有用。¹

作业者偶尔也会要求对井壁岩心做扫描。CT扫描是非侵入性的，不需要进一步处理岩心，可以对暴露的岩心或岩心筒内的岩心迅速开展。

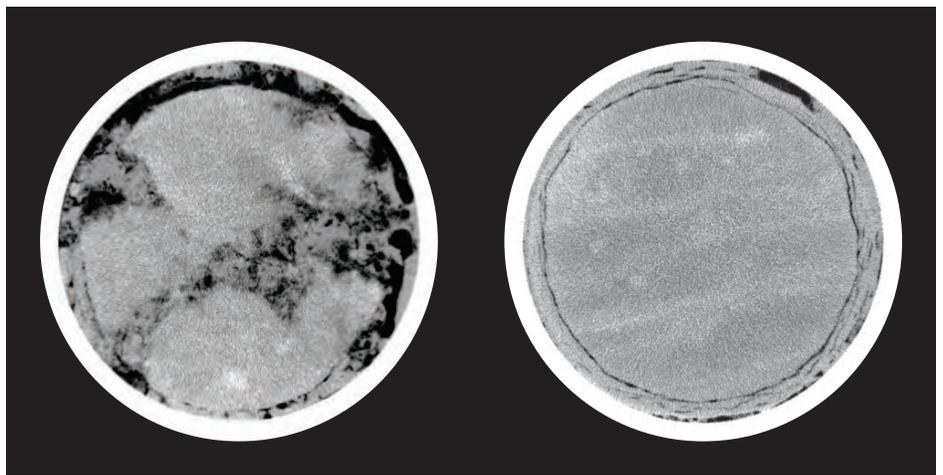
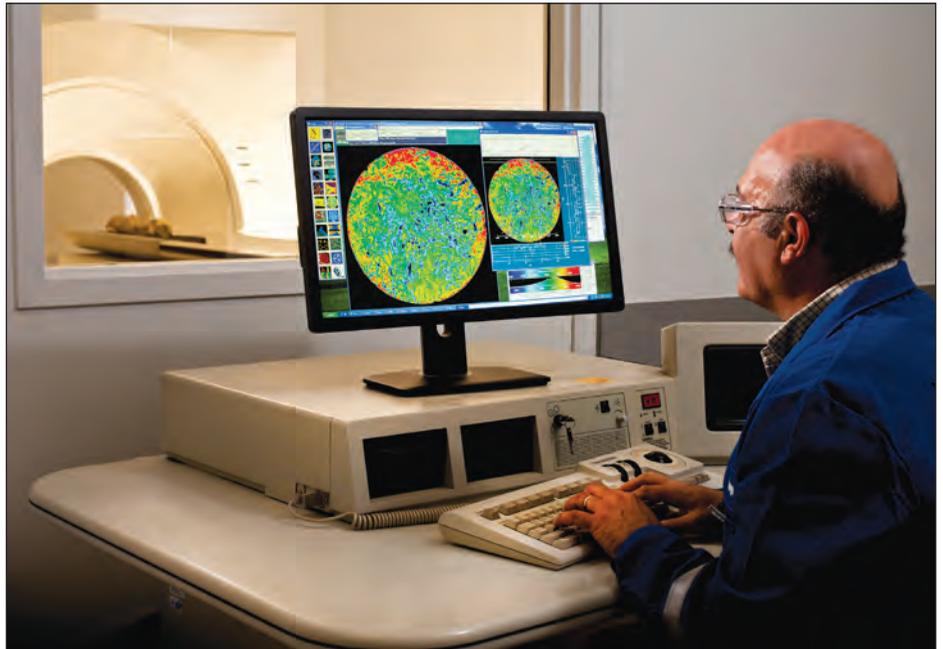
进行首次扫描之后，岩心分析员将岩心从筒中取出并进行处理，准备下一步检测。分析员使用镶嵌金刚石刀片的带锯或圆锯，将岩心沿长度方向一与岩心轴平行一切割成薄片。在大多数情况下，岩心偏离中心切割，而不是向中央切下。岩心板的厚度决定着可以从岩心采样的岩心塞的最大尺寸。薄片拍照准备工作需要将薄片的平面磨光，去除锯痕。

有些情况下，部分岩心不做切片。当岩心显示出实质性大规模非均质性时——一般是多孔碳酸盐岩、严重裂隙性或砂砾岩石——岩心段可以放在一旁不做切片，备用于全直径岩心分析。

对岩心薄片使用与专用计算机相连接的35-mm数码摄像机拍照，计算机可以将图像数字化、显示图像并传送到客户。照片通常可以分辨薄层内尺寸仅为十分之一英寸的各个分层。

数码拍摄突出显示了岩心的重要地质与岩石物理特点。这些高分辨率的彩色图像提供了关于岩性、层理特点、接触面、裂缝、化石、孔隙度、孔洞和沉积变化的重要直观记录，而以上特性可以在完成其他岩心检测之后详细研究。岩心图像的后续处理与分析通常会得到在原照片中不是显而易见的有价值信息。在某些情况下，岩心图像可用于调和岩心分析与测井数据之间的差异，发现因太薄而无法被测井工具识别的地层层理。

应客户要求，岩心需360°轴向包



▲ 全岩心 CT 扫描。随着样品通过 CT 扫描仪（顶部，背景图），孔隙特征在虚拟岩心薄片（顶部，前景图）中清楚显现。扫描图像色标有助于区分密度或矿物不同的区域。通过对比，灰度图像用于突出显示岩心损害。一块从哥伦比亚卡萨比油田的破碎地层中获取的岩心（底部图）在从岩心内筒中取出之前进行了扫描。堆叠的横截面显示了岩心部分受到损害的部位。白色外圈为岩心内筒；内筒里面一层钻井泥浆泥饼环绕着岩心。通过避开裂缝段（底部左侧），岩心分析员能够选择未受损害的层段（底部右侧）用于提取岩心塞。（CT 图像承蒙 Carlos Chaparro 与 Adriano Lobo 提供，哥伦比亚·波哥塔，哥伦比亚国家石油公司）

覆拍照，使用数码相机和装有滚动装置、拍照时可以纵向转动全直径岩心的岩心台完成。

照片在白光和紫外（UV）光中拍摄。在纯白光中拍摄的图像显示了在自然光照条件下的岩心。紫外光可以显示某些类型的矿物，但更重要的是，它可以增强非油藏部分与含油带的对比度。含油油藏岩石经常显现出强烈的紫外荧光。

通常来说，油会发出荧光，而荧光的亮度与颜色受到油组分的影响。

但是，有些油类不发荧光。另外，如果岩心在被提取到地面的过程中因冲刷作用损失部分油，或者如果岩心没有充分保护，产油层段可能不会均匀地发出荧光。²

用肉眼难以评估荧光；但是，数字彩色照片却记录了数值输入，因此被一些作业者用于后续计算机分析中。³每张照片由像素组成，而每个像素可以分配超过160万阴影中的一个。

地质学家通过过滤或调配颜色来突出显示某些重要特征。颜色数据的

溶剂	沸点	可溶性
二氯甲烷	40.1°C 【104.25°F】	油溶，水溶性有限
己烷	49.7°C至68.7°C 【121.5°F至155.7°F】	油
三氯甲烷/甲醇恒沸物	53.8°C 【128.8°F】	油，水和盐
丙酮	56.5°C 【133.7°F】	油，水和盐
甲醇	64.7°C 【148.5°F】	水和盐
四氢呋喃	65.0°C 【149.0°F】	油，水和盐
环己烷	81.4°C 【178.5°F】	油
氯乙烯	83.5°C 【182.3°F】	油溶，水溶性有限
甲苯	110.6°C 【231.1°F】	油
四氯乙烯	121.0°C 【249.8°F】	油
二甲苯	138.0°C至144.4°C 【280.4°F至291.9°F】	油
石脑油	160.0°C 【320.0°F】	油

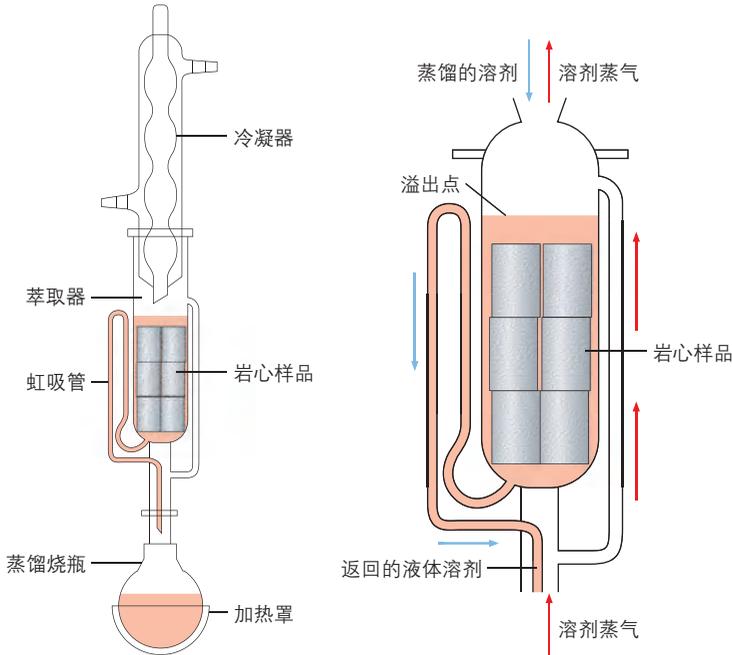
▲ 常用岩心清理溶剂，按沸点温度排序。溶剂选择一般取决于原油与岩石中所含矿物之间的湿润性相互作用。部分油类的完全萃取可能需要使用溶剂混合物或一系列溶剂。红线代表水的沸点。（表格改编自美国石油协会，参考6）

统计分析可以帮助地质学家们区分岩性或者确立孔隙度或渗透率下限值。计算机可以计算某个特定色彩范围内包括多少个像素，用于确定薄层段中的净砂层或净荧光。

虽然岩心装置一般能够容纳一系列岩样，但是常规岩心分析最常用的还是岩心柱塞。当孔隙系统相对均质时，岩心柱可提供可靠的岩心特性描述。⁴

岩心分析员有时与作业者的地质

师相互协作，从全直径岩心钻取岩心柱塞样品。大多实验室使用磨铣器或装有金刚石钻头的钻床来钻取岩心柱塞。分析员将岩心柱塞切割成标准长度，然后用端面磨床进行精确收面。最后样品为直圆柱体，一般直径为 38 mm 【1.5 in.】、长度为 64 mm 【2.5 in.】，各端为平面。通过制作标准形状和尺寸的岩心柱塞，分析员获得了横截面面积与长度相同的样品；因此，各个岩心柱塞可提供相同的总体



▲ 索氏 (Soxhlet) 蒸馏萃取器。蒸馏烧瓶 (左图) 中的溶剂被温和加热，直至溶剂气化。溶剂蒸气从烧瓶中上升，到达冷凝器时变冷凝结。冷却的液体溶剂滴到岩心上并渗入样品中。溶剂冷凝物将烃类和卤水从样品中带走。当萃取器中蒸馏的溶剂达到溢出点时，用过的溶剂被虹吸返回烧瓶中进行再蒸馏 (右图)。该过程连续重复并可按需求持续足够的时间。岩心中的烃类被集中保留在蒸馏或沸腾烧瓶中。部分索氏装置可以容纳多个岩心塞。

积。

一个标准尺寸的岩心塞也降低了不规则形状样品可能造成的潜在测量误差。

岩心清洗与流体萃取

除了岩石骨架，岩心样品还含有地层流体。如果岩心取自生产层，这些地层流体一般会含有烃与盐水或卤水的混合物。在实验室中，这些流体必须从岩石的孔隙空间中完全清除，否则将干扰常规岩心分析孔隙度与渗透率的测量。

岩心清洗与流体萃取结合在一个精细的过程中，这一过程必须足够彻底，以便将原油的重质馏分提出，同时又要足够温和，以避免破坏岩石的矿物成分。期间必须防止因为粘土和石膏等含水矿物发生脱水，或者溶剂通过样品时流量过大造成腐蚀而形成附加孔隙空间。⁵ 目前已有几项用于去除残余地层流体的技术开发成形；其中应用最广泛的技术涉及蒸馏萃取或连续溶剂萃取。

未切片岩心、岩心塞和井壁岩心使用一个专门的封闭回路系统进行仔细清洗，该清洗系统采用索氏清洗处理或迪安斯塔克流体萃取工艺。在索氏工艺中，样品浸没在溶剂中；在迪安斯塔克工艺中，溶剂蒸气和液体流经样品。两个工艺均依靠热量将水从岩心样品中驱出，依靠溶剂来萃取烃类 (上表左侧)。

索氏萃取法利用蒸馏过程来清洁岩心。索氏装置由带恒温控制器的加热罩、沸腾烧瓶、萃取器和冷凝器组成 (左图)。溶剂被温和加热，被蒸馏出来的溶剂集中在浸泡着一个或多个岩心样品的萃取器内。受热溶剂被连续地蒸馏，冷凝和回流。通过从萃取器中定期虹吸出来的溶剂的颜色来判断样品的清洁度；重复萃取过程，直至在延长的浸没循环之后萃取液保持清澈。该方法使用一种或多种溶剂来溶解和萃取岩芯样品中的油和卤水。

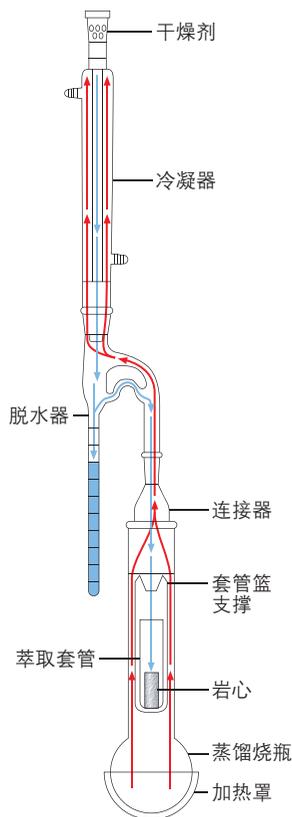
重复循环之后，由于没有更多的油从岩心中被萃取出来，萃取液应该变得清澈。但是，一种溶剂变清澈的

事实并不一定代表样品中的油已经被完全清除干净。⁶ 清洁样品可能还需要几种溶解能力逐级增强的溶剂。

另一种蒸馏方法，迪安斯塔克提取法，是确定流体饱和度的一个行业标准方法（右图）。岩心分析员首先使用分析天平对样品进行称重，然后将样品放入位于加热烧瓶之上的迪安斯塔克装置的套管中。烧加热烧瓶，将溶剂温度上升到沸点，随着溶剂蒸气从烧瓶中上升，岩心样品将被溶剂蒸气包裹。样品中的水分被溶剂气化并随着溶剂蒸气一起上升到冷凝器。在冷凝器中，气化水汽和溶剂蒸气冷却凝结后流入经过标定的接收管中。

由于密度大于溶剂密度，水将沉到接收管的底部。溶剂凝结液从管中溢流出来时，会滴到样品上。凝结液与岩样中的油混合，混合物会滴回下方的烧瓶中，在烧瓶中溶剂被再次加热，蒸发-冷凝循环继续。一旦接收管中水的容量达到恒定值，样品不再有水产出，迪安斯塔克蒸馏过程即结束。由于样品中的油与盐可能没有被完全清理干净，因此在迪安斯塔克蒸馏结束之后，将样品放入加热炉中烘干之前，通常会补充一次索氏清洗。

在迪安斯塔克蒸馏与索氏清洗之后，岩心分析员将样品称重，另外在烘干期间分析员将定期为样品称重（右图）。⁷ 清洗前后样品重量的差



▲ 迪安斯塔克装置。一名岩心分析员将岩心塞入样品测量装置中（照片）。迪安斯塔克装置（左侧）的典型配置包括一个电加热元件，或加热罩、一个带萃取室的沸腾烧瓶、一个样品套管或承托网、一个脱水器或标定的接收管以及一个冷凝器。迪安斯塔克方法可以量化地测量从岩心中萃取出来的水的体积，各个样品在独立容器中分别清洗。

4. Almon WR: “常规岩心分析综述”，Morton-Thompson D与Woods AM (eds): *开发地质参考手册, 第5部分-实验室方法*。塔尔萨: 美国石油地质学家协会, 美国石油地质学家协会勘探方法系列, 10号 (1993年10月1日): 201-203。

5. Macini P和Mesini E: “岩石物理学与油藏特性”，Macini P和Mesini E (eds): *石油工程-上游, 生命支持系统百科全书 2008*, 在联合国教科文组织的赞助下编写, 生命支持系统百科全书出版社, 英格兰, 牛津, <http://www.eolss.net> (2013年7月16号访问)

6. 美国石油协会 (API): *岩心分析推荐方法*。华盛顿DC: 美国石油协会勘探生产部, 推荐方法40, 第二版, 1998年2月。

7. 将岩心放入烘箱内烘干, 直至其重量在规定的时段中变的恒定, 这说明岩心中的所有水分已经蒸发。一般情况下使用对流烘箱或真空烘箱来干燥样品。但是, 如果岩心含有石膏或水合性粘土, 样品将被放入装有调节相对湿度的水气注入系统的烘干箱内进行干燥。



▲ 岩心塞称重。在清洁与萃取过程中的每一步中, 需要对各个样品进行精确称重, 因为重量上的小幅差值即会影响颗粒密度计算以及其他重要油藏参数—例如流体饱和度—的后续确定。

值即为被萃取出的流体的重量。经过标定的接收管测量萃取出的液体的体积，然后体积值使用蒸馏水的密度转化成重量。剩余重量差对应的是被萃取出的油的重量。通常情况下会假设一个油密度值，以便根据重量确定油的体积。

然后，分析员测量岩心样品的孔隙体积；孔隙体积与水油体积之和的差即为气体体积。这些流体的体积除以孔隙体积，转化得到流体饱和度。

实验室有时采用其他清洗和萃取工艺来适应不同类型的岩样。分析员针对含有矿物结构微妙的极细粘土的岩心开发了一种专门的工艺。使用一系列相互混溶的溶剂清洗岩心，各种溶剂按顺序注入，每种溶剂排替一种孔隙流体，按顺序注入的每种溶剂被后续注入的溶剂排替。在流过式清洗期间，溶剂可以连续注入或定期暂停，以便溶剂渗入岩心。

对于岩心快速处理，实验室工作人员可以使用能将加热溶剂注入样品的快速萃取器。多个岩心可以通过单次操作进行分析；各样品被分别放入单独的压力容器中，然后快速萃取器加热溶剂并将热溶剂以高压泵入样品中。各个样品排替出的流体分别收集。

关键测量参数

孔隙度与渗透率是理解一个油藏如何产油的重要测量参数。孔隙度是一个评价油藏储存能力的参数，可以

$$\phi = V_p / V_b,$$

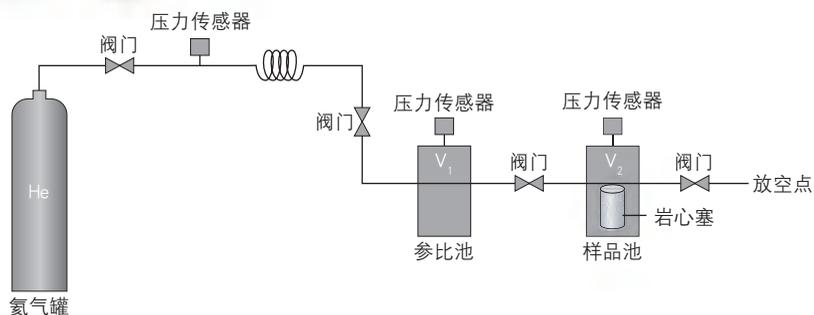
$$\phi = (V_b - V_g) / V_b,$$

$$\phi = V_p / (V_p + V_g),$$

式中

ϕ = 孔隙度
 V_p = 孔隙体积
 V_b = 总体积
 V_g = 颗粒体积

▲ 孔隙度关系。孔隙度的定义是孔隙体积与总体积之比。由于总体积即颗粒体积与孔隙体积之和，测得两者中任意一个即可计算第三个体积值以及进行后续的孔隙度计算。



▲ 波义耳定律孔隙度分析仪。孔隙度分析仪（顶部图）测量参比池与样品池之间的压力差，确定孔隙体积和颗粒体积。基本系统示意图（底部图）显示了孔隙度分析仪的内部工作原理，以及有固定已知内部体积的参比池和样品池。该套装置也配置了用于向各池内放入带压气体的阀门、测量压力的压力传感器以及连接压力气体容器与参比池样品池的必要配管。阀门校准、操作以及结果计算完全自动化。（照片承蒙美国岩心实验系统公司提供）

通过测量颗粒体积、孔隙体积和总体积来确定（下文公式）。三个体积参数中只需要两个即可确定孔隙度，孔隙体积是在模拟上覆岩层应力条件下测量的。

多年来，科学家们已经开发了各种测量这些岩心体积参数的方法；多数方法以重量、长度、体积或压力的物理测量为基础。部分测量参数直接从样品获取；其他参数取决于流体排替。

直接测量结果可以用于确定总体积。岩心分析员可以简单地使用数显卡尺或千分尺测量岩心塞的长度与直径。推荐最少测量五次。岩心塞的横截面积从平均直径计算得出，然后乘以平均长度得到总体积。⁸ 在一些实验室中，用数显卡尺获取的岩心测量数据被自动录入计算中，计算机可计算几何总体积、形状因数、有效流通面积及卡尺体积因数。

其他工艺基于流体排替的阿基米德原理：完全浸没于液体中的固体排出的液体量与其体积相等。排替量可从体积或重量角度测量。

求总体积的体积方法利用的是孔隙度分析仪中的少量水银。⁹ 首先，将空的孔隙度分析仪样品室充满水银，确定样品室体积。然后将水银排出，插入岩心塞，再次将样品室充满水银。充满空样品室的水银体积减去充满带样样品室的水银体积，等于样品的总体积。

重量方法利用放在实验室天平上盛满水银的烧杯进行测量。烧杯与水银分别称重之后，将经过清洁干燥、重量未知的岩心塞浸入水银中。样品浸没增加的重量除以水银的密度，得到总体积。今天，许多实验室倾向于不使用水银，而是应用阿基米德原理，使用其他液体，如卤水、精炼油或甲苯。¹⁰

确定总体积之后，分析员测量样品的颗粒体积与孔隙体积。测量颗粒体积与孔隙体积一从而确定孔隙度一最快最常用的装置是全自动孔隙度分析仪（上图）。该装置利用波义耳定律，根据当已知数量的流体被排入含有岩心的膨胀室时测得的压力下降值，计算孔隙度。在这种情况下，测

$$P_i V_i = P_f (V_i + V_l + V_p)$$

式中

- P_i = 初始压力
- P_f = 系统内最终压力
- V_i = 参比室内初始体积
- V_l = 连接线路的体积
- V_p = 样品的孔隙体积

▲ 孔隙体积计算。根据波义耳，孔隙体积可以利用孔隙度分析仪中初始压力与最终压力之差进行计算。

量使用的气体为氦气。¹¹

为了测量孔隙体积，分析员将清洁干燥的岩心样品装入配有人造橡胶套管的岩心夹持器中。对套管外部施加气压时，套管收紧到岩心的形状。在该装置中，岩心夹持器代替了孔隙度分析仪样品室。

首先将参比池与夹持器中的岩心隔离，并充满特定压力的氦气。然后打开样品池阀门，使氦气压力在参比池与受限样品的孔隙体积之间均衡。通过总体积和孔隙体积测量结果计算孔隙度（上文公式），除了样品不受侧限，不带套管直接放入样品室中之外，测量颗粒体积的过程与孔隙体积测量相似。

渗透率是测量岩石流体传输能力的参数，是另一项关键的油藏特性。

在实验室中，分析员通过使已知粘度的流体按设定流量流经一个已知长度和直径的岩心，然后测量穿过岩心的最终压降，来确定渗透率。对于常规岩心分析，流体可以选择空气，但更经常用的是氮气或氦气，具体根据所用渗透率分析仪的类型而定。

分析员将一段干净干燥的岩心装入特殊设计的岩心夹持器中，在夹持器中岩心被一个气密的人造橡胶套（下图）包住。渗透率仪将带压气体从入气口注入岩心。在出气口测量压差和流量。该配置用在稳态气测渗透率仪中。

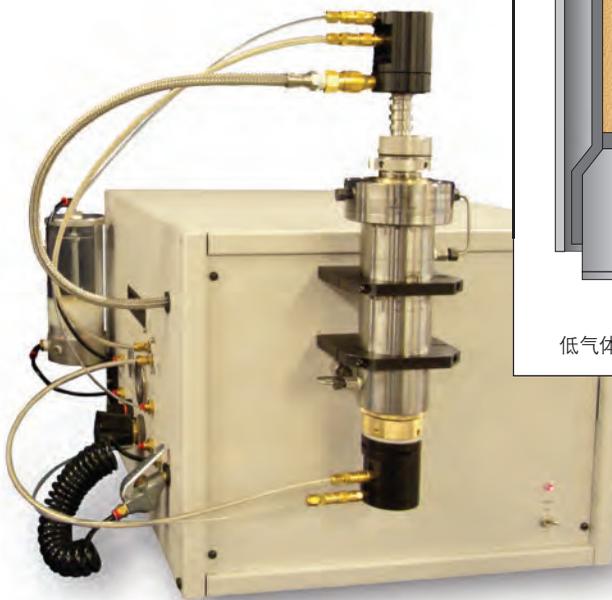
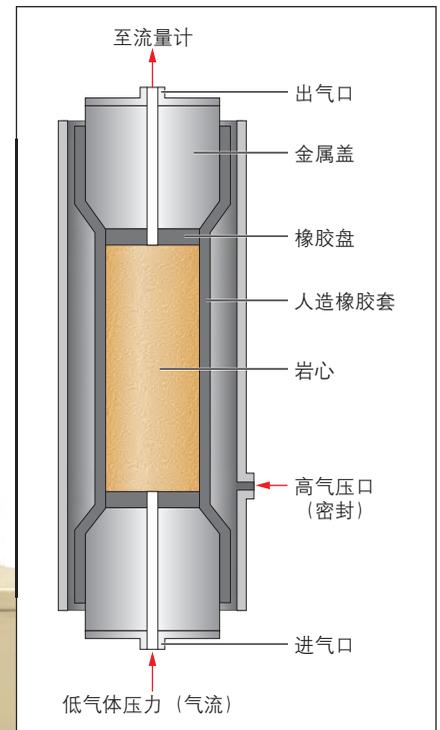
在一种确定渗透率的替代方法中，分析员对样品室施加高压然后打开阀门，使气体随着压力下降流经岩心塞。如果实验室使用这种非稳态或压力动态渗透率仪，分析员可以利用压力变化的时间比率和流出流量来解算岩心的渗透率。

分析员应用校正来补偿实验室数据与井下实际条件之间的差异。¹² 他们通过对一个或多个代表性岩心塞样品施加侧限应力，补偿应力差；一些渗透率仪能够施加高达70 MPa【10,000 psi】的侧限压力。分析员经常利用几种侧限应力来确定应力对渗透率的影响。

响，然后对其他常规渗透率测量应用油藏侧限压力的校正系数。

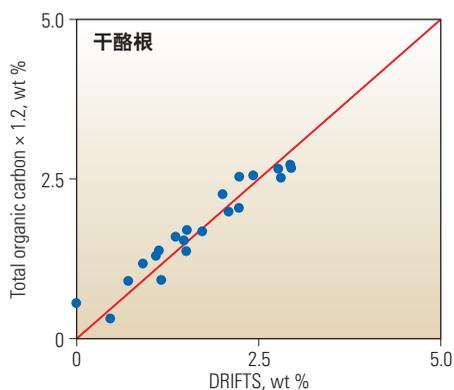
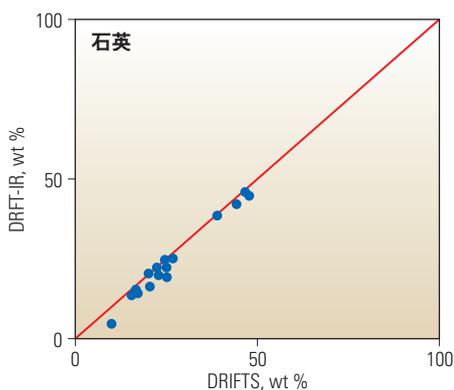
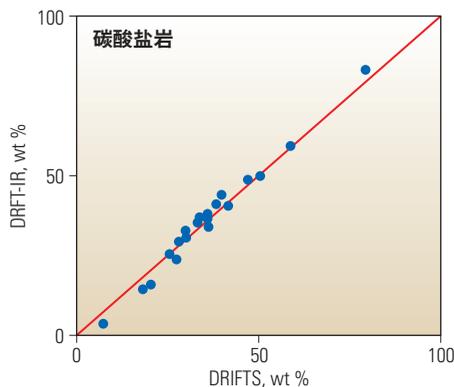
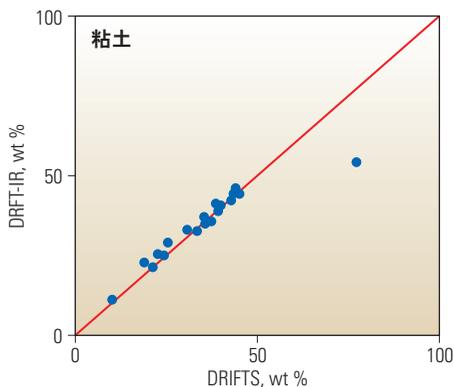
孔道内气体渗流不同于液体渗流，因为孔隙壁的流动界面条件对于气体和液体是不同的。与气体相比，液体在孔隙壁受到较大的渗流阻力或拖曳。这种气体滑脱效应可以通过分步增加岩心塞中的平均气体压力-即增加孔隙壁的拖曳能力-来校正。克林肯伯格校正是这些测量对无限气体压力的推算，在此点气体动态假定与液体相似。¹³

分析员对通过弯曲流体通道的高气体流量应用补充校正。福希海默校正解决了当气体经过小孔孔喉加速，进入孔道后减速而产生的效应。在很多全自动的非稳态气测渗透率仪中，克林肯伯格和福希海默校正正在分析期



▲ 测量气体渗透率的哈斯勒岩心盒。岩心样品放入一个人造橡胶套中。装置两端的金属盖配有用于气体进出的轴孔。渗透率仪（照片）从底部进气口加压注入气体，气体通过岩心之后从出气口流入流量计。用达西方程计算渗透率。（照片承蒙美国岩心实验系统公司提供）

8. 美国石油协会，参考6。
9. 使用水银是因为水银是一种接近完美的非湿润性流体，在常压下不会进入岩石孔道。
10. 美国石油协会，参考6。
11. 使用氦气的原因：氦气是一种不易吸附到岩石矿物表面上的惰性气体，在适度压力和温度下，氦气倾向表现出理想的气体行为。而且，氦原子的小尺寸能够使其快速进入岩心的微孔系统，穿透尺寸接近0.2nm的极小孔道。关于孔隙度分析的更多信息：Cone MP和Kersey DG：“孔隙度”，Morton-Thompson D和Woods AM (eds): 开发地质参考手册，第5部分-实验室方法。塔尔萨：美国石油地质学家协会，美国石油地质学家协会勘探方法系列，10号（1993年10月1日）：204-209。
12. 美国石油协会，参考6。
13. Klinkenberg LJ：“多孔介质的液体与气体渗透率”，钻井与生产时间，（1941）：200-213。Rushing JA, Newsham KE, Lasswell PM, Cox JC和Blasingame TA：“致密含气砂岩中克林肯伯格校正渗透率测量：稳态与非稳态测量技术”，论文SPE 89867，于SPE年度技术会议展览上提出，休斯顿，2004年9月26日-29日。



▲ DRIFTS 测量结果的确认。在垂直评价井中，对于粘土、碳酸盐岩和石英含量，DRIFTS 测量结果比同行的 DRFT-IR 分析结果更有利。DRIFTS 分析得到的干酪根含量与 LECO 总有机碳测定值相互比较。DRIFTS 测量干酪根的重量百分比，该百分比也涵盖了碳以外的其他元素；因此，业内采用 1.2 的系数来建立总有机碳含量与干酪根含量的关系。以上曲线显示出 DRIFTS 与其他测量之间良好的一致性。

间会自动运行。

分析结束之后，实验室将实验报告与照片数码复件及扫描数据一起发送给客户。根据客户指示，岩心可以保存起来，归还客户，或者在岩心库中存档备以后参考。

岩相分析

常规岩心分析帮助作业者分析油藏岩性、层理特征、残余流体以及孔隙度和渗透率，但是这些参数只提供了可以从岩心中提取的部分信息。补充岩相测试提供了更多的岩心分析性结果和可视记录。

扫描电子显微镜具有分辨纳米级特征的放大功能，能够用于检测岩心表面的岩相特征。扫描电子显微镜使用精细聚焦的电子束扫描样品表面，形成以电子束—样品相互作用为基础的图像。

电子探测器负责接收样品表面岩

相数据，而背散射探测器可辨别穿过样品表面的组分变化。

分析员使用彩色阴极发光探测器来研究矿物组分变化，包括相变和微量元素分布。这种探测器能够可视化显示化学退变质与增生、增生区带分布及内部愈合裂隙。这些图像提供了了解矿物晶体生长、更替、变形及起源的信息。岩相学应用包括沉积岩固结与成岩作用，碎屑岩物质起源以及化石内部结构的研究。

漫反射傅立叶变换红外光谱 (DRIFTS) 是一种适合测量矿物学特征与有机质含量的专门技术，而矿物学特征与有机质数据提供了支持泥岩储层完井设计的手段。

科学家们可以分析岩心、岩屑或岩石露头样品。DRIFTS (漫反射傅立叶变换红外光谱) 分析非常快速；一次 50 秒钟的扫描可确定矿物学特征与有机质含量。斯伦贝谢的专利样品处

理程序使其能够被用作岩石组成的量化测量。该工艺只需要 5 g 【0.18 ozm】的小样即可分析。

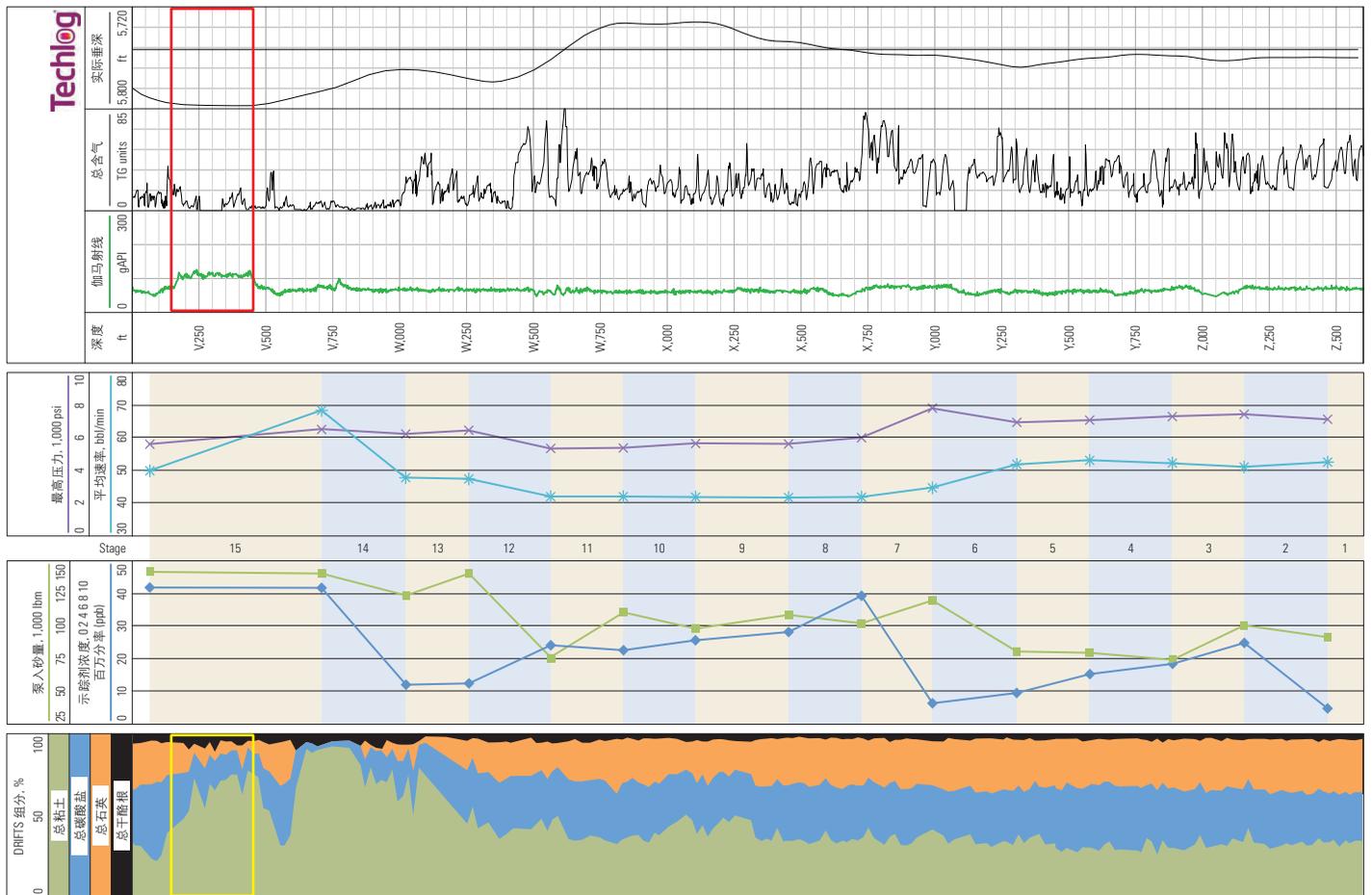
该装置使用多种波长的红外线扫描样品。光线穿过岩石过程中发生散射。根据光谱频率和幅度的回归分析，分析反射的红外能，从而确定各样品的岩性、矿物学特征和有机质含量。

为了对岩性与干酪根测量结果进行初步校准，分析员对代表样品做双波段傅氏转换红外光谱 (DRFT-IR) 和 X 射线荧光 (XRF) 扫描，确定岩性，并做 LECO 总有机碳扫描，确认有机质和干酪根含量。DRFT-IR、XFR 全面研究与总有机质含量测定完成后，可以快速采集 DRIFTS 数据，向作业者提供及时信息用于做出完井决策。

一家美国西部的作业者对曼科斯页岩井进行了 DRIFTS 分析，以评估 DRIFTS 在非常规储层矿性与干酪根含量辨识方面的可用性。首次研究集中在一口经过取芯和测井的直井上。该井提供了一个评价曼科斯页岩的广泛数据库。

实验室使用岩心破碎样品来确定矿物学特征和有机质含量。除了 DRIFTS 数据，评价内容也包括了根据 DRFT-IR、XRF 分析及总有机碳测量而确定的矿物特征。这些传统的分析方法使用了与 DRIFTS 分析相同的破碎样品。评价结果显示，DRIFTS 分析结果与其他三种更加精确的分析方法之间有良好的 consistency (上图左侧)。这些结果给了作业者在曼科斯地层中钻的其他井上应用 DRIFTS 方法的信心。

本次研究的第二口井是一口水平生产井。靠近井眼根部位置，伽马射线测量结果高与泥浆录井气测读数低说明这口井可能在主要目标区之外。随着井眼在地层剖面中向上移动，伽马射线的响应性逐渐降低，说明目标井段的油藏质量较好；这与朝向井眼



▲ 伽马射线在膨润土区段的响应。从 V,100 至 V,400 ft 测深，伽马射线测井（顶部第三道）读数高，解释为膨润土区段（红色方框）。井眼轨迹（第一道）变为穿过该区段向上钻井。伽马射线记录数值高，结合泥浆录井气测读数低（第二道），是油藏质量差的典型标识。该水平井所有区段都进行了增产。在膨润土区段，在同样压力下压裂所需的注入流速（第 4 道）较高。示踪测井结果（第 5 道）显示在 15- 级井段存在化学示踪剂，这说明在各阶段支撑剂得到成功放置。DRIFTS 分析结果（第 6 道）显示整个区段都存在干酪根，这给了岩石物理学家明确信息，即虽然伽马射线读数高，泥浆气测读数低，膨润土区段（黄色方框）仍然是曼科斯生产层中的一个薄层带。

趾部的泥浆录井气测读数相一致。

在井眼跟部，DRIFTS记录的干酪根的含量已超出了作业者基于常规粘土，硫酸盐岩石石英所设定的下限，但这与自然伽马与气测吻合很好。从井眼跟部开始，其他数据显示出不可接受的高粘土含量，这验证了早期的伽马射线解释结果，即这口井钻到了目标区之外。但是，在井眼跟部DRIFTS数据显示出异常高的岭石含量，一般是认为存在于曼科斯页岩中的薄膨润土层。同时，井眼跟部表现出较高的干酪根含量（与井眼跟部的3.1%至4.3%范围相比，跟部干酪根含量达到5.6%）。这些通过随钻测量无法得到的发现，给了作业者明确信息，即膨润土区段是一个异常薄层，并不能代

表周围的曼科斯地层。

压裂后数据显示，虽然成功突破富含粘土的膨润土区段需要较高的注入流速，但是通过放置足量的支撑剂，该井成功实现了增产。作业者正在将这些数据结合在未来的完井优化研究中。

作业者们也在他们的地层评价方案中将其他数据与这些重要的标准测量相结合。岩心分析将继续通过多种形式向作业者提供做出钻进、弃井或完井决策的辅助信息。

在某些情况下，常规分析与岩石学研究可向作业者提供所有需要的岩心信息。更常见的是，从这种有价值的资产中可以进行其他分析工作，包括多相流体饱和度以及毛细管压力和

相对渗透率等渗流特性评价；用于优化测井参数计算分析，例如从测井数据计算孔隙度与饱和度有关的岩电实验、流动保障研究、地质力学分析或提高原油采收率实验。这些测量手段为油藏评价带来了极大的价值，而所有测量手段都始于常规岩心分析。

—MV