轻如羽毛　硬如岩石

直到最近，设计和制备密度近似于水的高封隔质量的固井水泥浆才成为可能，使用这种新的轻质固井水泥，可以获得低渗透率和高的压缩强度。这对于保证井眼的完整及层间的有效封隔是非常必要的。而且，这种水泥浆密度很低，足以防止地层的破裂及泥浆的循环漏失。

Abdullah Al-Suwaidi
Christian Hun
阿布扎比陆上石油作业公司
阿联酋阿布扎比

José Luis Bustillos
墨西哥 Ciudad del Carmen

Dominique Guillot
Joel Rondeau
Pierre Vigneaux
法国 Clamart

Husam Helou
阿联酋阿布扎比

José Antonio Martínez Ramírez
José Luis Reséndiz Robles
Petróleos Mexicanos (PEMEX)
墨西哥 Ciudad del Carmen

在编写本文过程中得到以下人员的帮助，谨表谢意：科威特 Ahmadi 的 Wassim Assaad 和 Mohamed Jemmali；法国Clamart的Jean Marc Boisnault，Philippe Drecq，Bruno Drochon，Martin Hyden，Bernard Piot 和 Benoit Vidick；美国得克萨斯州 Sugar Land 的 Leo Burdylo，Andre Garnier，Roger Keese，Erik Nelson 和 Dwight Peters；阿拉伯联合酋长国阿布扎比的Sherif Foda 和 Philippe Revil；美国得克萨斯州休斯敦的 Greg Garrison；美国路易斯安那州新奥尔良的 Stephan Harris；以及苏格兰阿伯丁的Robert Roemer。
CBL Adviser，CBT（水泥胶结仪），CemCADE，CemCRETE，CET（水泥评价仪），LiteCRETE，PAL（管柱分析测井），SFM（固体成份监测），USI（超声成像仪）和 Variable Density 是斯伦贝谢公司的商标。Windows 是微软公司的商标。

通过井眼加固使得各层之间完全隔离开来，可以保护环境，提高钻井的安全性并能使产量增加。如果没有高质量的固井水泥充填于套管与地层之间，那么油藏上部或下部的淡水层就有可能被来自其他地层中的流体污染。没有水泥固结的套管也易于被地层流体腐蚀。超过地层破裂压力的钻井液，可能导致地层的破裂、泥浆的循环漏失，从而引起钻井、固井过程中井的失控，这意味着钻井液无法返回地面。这种情况在泥浆的重量超过地层破裂压力，而又没有对不牢固地层进行保护的情况下尤为常见。此时，循环钻井液就会漏失于地层的裂缝之中，无法返回井液循环系统。如果油气流向别处而非井眼，就会影响产量。

首次于1995年推出的CemCRETE水泥，在极度恶劣的油田环境下，始终具有良好的效果。它具有合乎工程要求的粒径分布，从而保证了高的压缩强度，并且由于密度范围大，层间的封隔非常完全[1]。最近，轻质CemCRETE水泥，即所谓的 LiteCRETE 技术，已取得了很大的进展。现在这种技术可以提供密度与水相近的水泥浆。

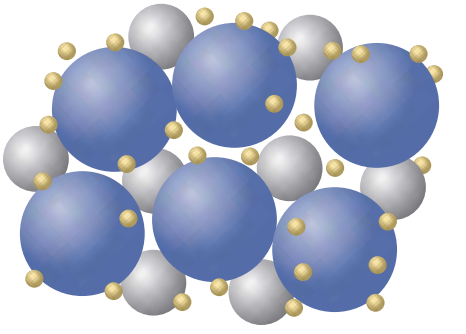
改进的 LiteCRETE 技术在恶劣的作业环境下也很有效。或许，对于轻质泥浆固井环境而言，最大的挑战是控制泥浆的循环漏失。既使是最轻的钻井泥浆或固井水泥浆，也有可能漏失于不牢固的或破裂的地层中。在泥浆的循环漏失带进行固井，常常需要对特定段采用多级工具、顶部作业，以及其它补救措施来保证不牢固地层与含水层之间的封隔性，这将发生额外的费用[2]。

高性能的轻质水泥固井技术改进了层间的封隔性。这种超轻水泥可以保护淡水层，并且使套管免受腐蚀，其原因是这种水泥即使是在最易发生泥浆循环漏失的区域也可以在井眼中达到比传统的水泥浆更高的位置。不牢固地层可以使用不超过地层破裂压力的 LiteCRETE 水泥进行完全的固结。LiteCRETE 水泥塞强度很大，足以用来充当启动塞或造斜塞。而且用 LiteCRETE 水泥固结的生产套管可以很好地进行射孔作业，而不会产生裂缝。使用这种水泥得到的渗透率低于传统的 G 级 Portland 水泥，其压缩强度可以与 Portland 水泥媲美。LiteCRETE 水泥可以在温度范围为 80-450°F（27-232°C），井底压力达8000psi（55.15MPa），水泥浆密度为 8.2-12.5lbm/gal（0.98-1.50g/cm^3）的条件下成功地使用。

本文将回顾高性能的固井技术，讨论怎样把比水还要轻的水泥浆成功地混合并注入井中的，并且将说明在不使用泡沫水泥的情况下，超轻水泥固井作业中SFM固体成份监测技术的作用。我们还将讨论最近发生在阿布扎比以及中东其它地区和墨西哥的一些成功作业案例。

减轻负荷

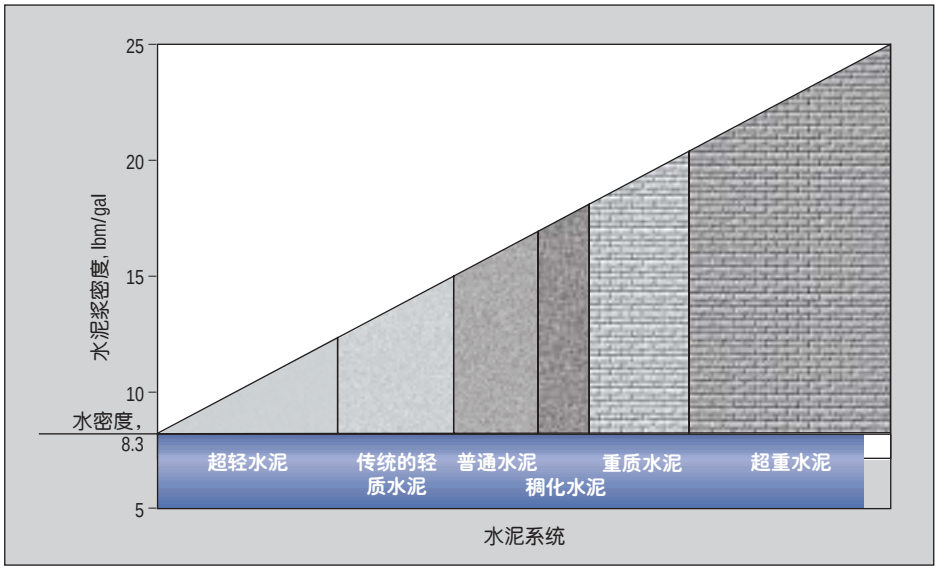
CemCRETE 技术是一种水泥基水泥浆技术，能够在保证固结水泥质量的同时，优化注入过程中水泥浆的性能。为了获得这种高效的水泥浆需要将多种粒径的颗粒混合在一起，使给定的体积中固体颗粒的量达到最多（*右图*）。水泥的总体性质（如密度）主要取决于粗颗粒的性质。中等粒径的颗粒使得水泥具有一些特殊的化学性质，例如化学稳定性和热稳定性。最小的颗粒保证泥浆具有特定的基质性质，包括稳定性、泥浆漏失控制以及渗透率等。为了在保持理想的流变学特性（水泥浆必须是均一、稳定且易于注入井中）的同时使水泥浆具有某一特定密度，可以将类型以及粒径分布不同的颗粒混合起来[3]。



> 优化的粒径分布。小粒径颗粒占据大颗粒间的空隙，这使得水泥浆中固体成分含量增大，而固结后水泥的渗透率降低。

1. CemCRETE技术介绍参见：Boisnault JM，Guilot D，Bourahla A，Tirla T，Dahl T，Holmes C，Raiturkar AM，Maroy P，Moffett C，Perez Mejia G，Ramirez Martinez I，Revil P 和 Roemer R：“固井技术的稳步发展”，《油田新技术》，11卷，第1期（1999年春季刊）16-29。
2. 多级工具用于多级固井作业中，当固结不足以支撑一段长流体柱的不牢固地层时，通常要进行多级固井作业。多级工具能够使第一阶段的固井水泥浆通过浮鞋或引鞋而不经过多级工具进入套管与地层间的环空中。接着一个通道炸弹（opening bomb）被放下，该炸弹用于打开多级工具的通道，并防止接近炸弹的下面。第二阶段的水泥浆被注入套管，通过多级工具打开的通道进入环空，完成固井作业。

当充填地层与套管间的环空时，有可能需要进行顶部作业。顶部作业是将水泥直接由地面注入环空，而不是先沿钻杆注入再回返进入环空。



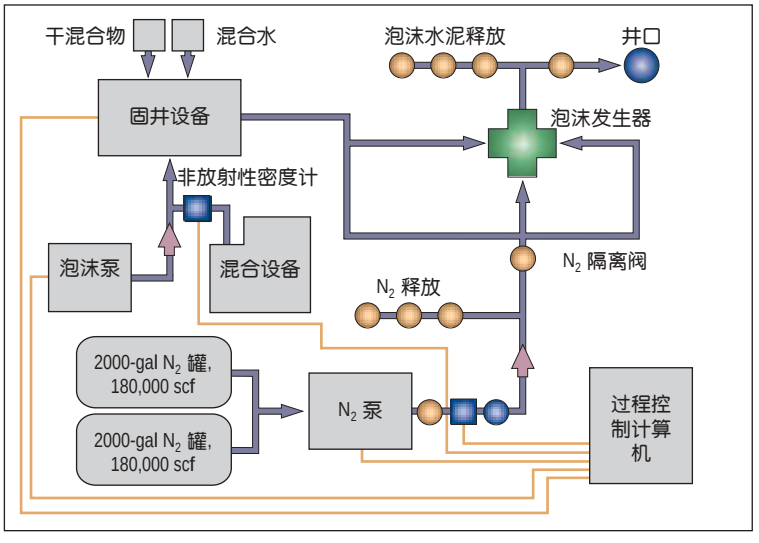
> 根据水泥浆密度的不同对固井水泥进行的分类。

传统固井设备

移动固井设备

固井车

泡沫固井设备



> 固井设备。利用泵式或车载式装置（*顶图*），可以混合制成传统的水泥浆，并且可以将水泥浆注入井中。干混合物可以储存在现场的储存仓中。泡沫固井作业（*底图*）要求有一个氮气泵、氮气罐和一个用于放置电子设备、流量计和其他装置的容器，另外，还需要有常规固井作业中的设备。由于钻机不同，在每一项工程中，根据钻机上的可用空间对泡沫固井设备进行不同形式的组装。

CemCRETE水泥浆具有65%的干混合物，其密度为24lbm/gal（2.88g/cm³）。这种泥浆已经混合成功，并且可以顺利地注入井中。

另外，为了适应困难的固井环境，正在开发密度越来越低的水泥浆（*左图*）。以前，只有加水或使用泡沫水泥系统，才可以降低水泥浆的密度。但是，增加常规的Portland水泥的水含量将导致水泥固结后具有高的渗透率、低的压缩强度，保护套管免受腐蚀的能力也会变差。

20多年前，为了满足轻质固井水泥的应用要求，开发了泡沫水泥系列。现在这种水泥在一些特定的情况下仍然十分有用[4]。泡沫水泥系统要求使用特殊的设备将氮气或空气混入水泥浆中，以降低水泥浆的密度（*左下图*）。水泥浆中加入表面活性剂，以生成泡沫或使泡沫在水泥浆固结前保持稳定。密度范围在3.5-15.0lbm/gal（0.42-1.80g/cm³）中的泡沫水泥可以直接注入井中[5]，但是泡沫量大于30%或密度接近9.0lbm/gal（1.08g/cm³）的泡沫水泥固结后不可能象LiteCRETE水泥那样，具有低的渗透率和高的压缩强度[6]（*下一页*）。泡沫水泥适用于一些有限的特殊情况，例如在深

3. Maroy P和Baret JF："Oil Well Cement Systems，Their Preparation and Their Use in Well Cementing Operations，"欧洲专利号621,247（1999年7月7日）。
4. 关于泡沫水泥更多信息请参阅：de Rozieres J与Griffin TJ："Foamed Cement，" in Nelson EB：Well Cementing。美国得克萨斯州Sugar Land：斯伦贝谢Dowell(1990)：14-1—14-19。
5. 参考文献4：14-1。
6. 泡沫质量是指气体体积与系统总体积的比值，用百分数表示。

   关于泡沫水泥特性更多信息请参阅：de Rozieres J和Ferriere R："Foamed-Cement Characterization Under Downhole Conditions and Its Impact on Job Design，"SPE开采工程，6卷，第3期（1991年8月）：297-304。
7. Rondeau J和Vigneaux P："Fluid Mixing System，"美国专利申请号09/726,784，2000年11月11日存档。

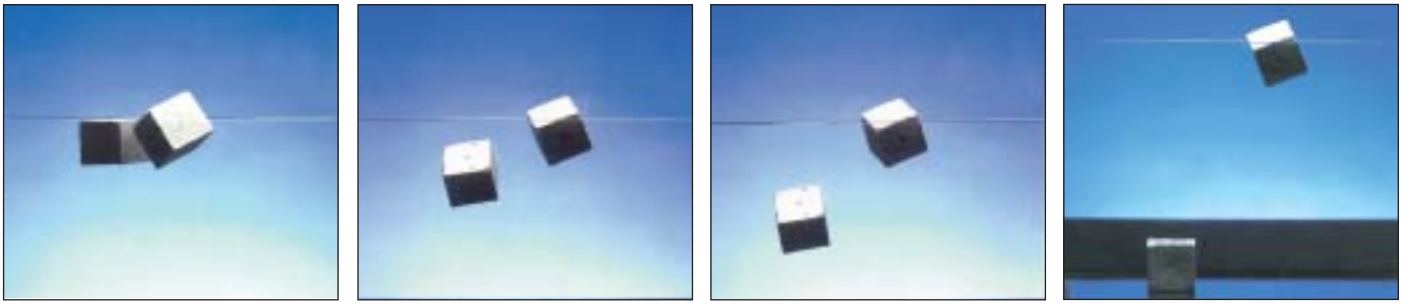
水钻井中控制近地表地层中的水流。但是，快速固结的 LiteCRETE 系列水泥也适用于这样的环境。

LiteCRETE 水泥浆具有优化的粒径分布并且含有特殊的低密度颗粒，这使得水泥浆性质的调整可以不依赖于含水量。最轻的 LiteCRETE 水泥浆，密度低于8.34lbm/gal（1.00g/cm³），其密度之轻足以使一块固结水泥浮于水中。虽然这些超轻水泥浆具有低密度的特点，但是在注入井中时，却含有 60% 的固体物质，40% 的水。一旦凝固，这种超轻的 LiteCRETE 水泥浆就具有与第一代 LiteCRETE 水泥浆一样的低渗透率和高压缩强度。

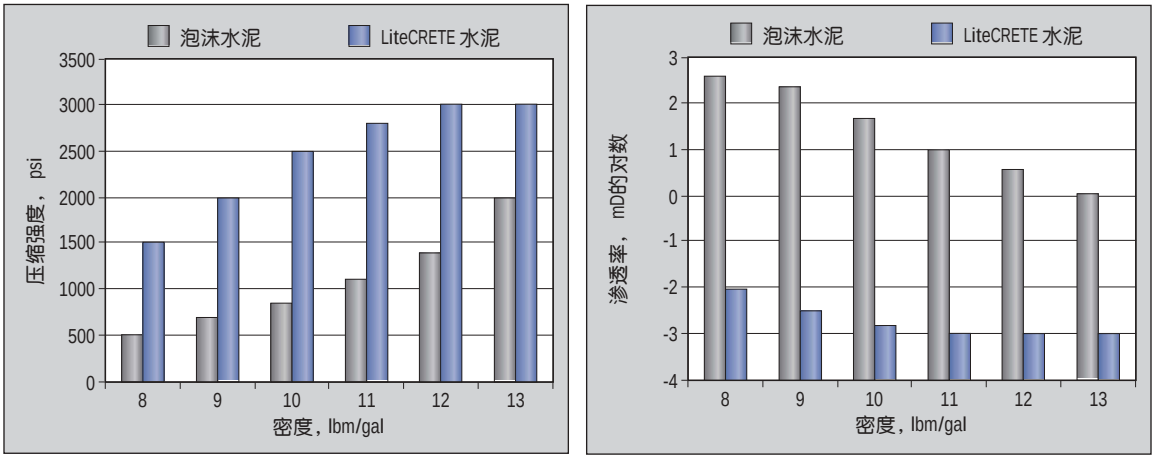
新的质量控制技术

质量控制是成功地使用低密度水泥浆进行固井作业的关键。另外，为了使固结水泥浆具有优良的性质，质量控制也很重要。质量测定的关键问题之一是确定固井水泥浆中固体成分的含量，它反映着水泥浆中干混合物的百分比。固体含量可以由干混合物的体积除以水泥浆的体积，再乘以100计算得到。固体成份的含量加上孔隙度或混合水的含量等于100%。在传统的固井作业中，密度计可以测量水泥浆的密度，固体含量可以通过确定密度而求得。然而，对于超轻水泥浆而言，干混和物与混合水的密度几乎相同，使用密度计不能确定水与固体之间的差别。既使水泥浆完全由水组成，密度也是一样的。尽管少量的水泥浆可以在实验室条件下分批地混合，并且可以对其进行质量控制，但当需要大量水泥浆时，这种做法是不符合实际要求的。开发低密度 LiteCRETE 系统的工程小组认识到发明另外一种质量控制技术是非常必要的。

斯伦贝谢公司在法国 Clamart 的 Riboud 产品中心的工程师发明了 SFM (固体成份监测)系统。这一专利技术是一种实时水泥浆质量控制新方法，它可以不依赖水泥浆的密度，准确地测定固液比。[7]该系统的开发过程非常短，只花了90天的时间，并且还将这一技术首



> 固结后水泥浆渗透率的对比。密度均为 8.0lbm/gal（0.96g/cm³）的 LiteCRETE 水泥浆与泡沫水泥浆固结后的立方体，开始时都可以浮在水中，如左侧照片所示。几秒或几分钟后，由于泡沫水泥浆凝固后具有高渗透率，所以其立方体开始被水饱和并下沉。图中不同时间的照片显示了这一过程。



> 泡沫水泥浆与 LiteCRETE 水泥浆固结后，渗透率与压缩强度的比较。

固体成份计算

(1) 孔隙度 (%) = 体积$_{混合水}$/体积$_{水泥浆}$ x 100

(2) 固体成份 (%) = 体积$_{混合}$/体积$_{水泥浆}$ x 100

(3) 固体成份 + 孔隙度= 100 %

(4) 根据密度计算的固体成份 = $(\rho_{水泥浆} - \rho_{混合水}) / (\rho_{混合} - \rho_{混合水})$

(5) 根据流量计算的固体成份 = $(Q_{水泥浆} - Q_{混合水}) / Q_{水泥浆}$.

根据密度计算固体成份实例

(8.38 – 8.34) / (8.45 – 8.34) = 36%

(8.42 – 8.34) / (8.45 – 8.34) = 72%

> 由密度与流速推算固体含量。水泥浆孔隙度指混合水体积与水泥浆体积之比；固体成分含量指干混合物体积与水泥浆体积之比。水泥浆孔隙度与固体成分含量之和为100%，如图中前3式所示。通过密度（*4式*）与流速（*5式*）可以计算得到固体成分含量。对于密度近似于水的水泥浆，通过密度推算固体成分含量的实例表明，密度相差 +/-0.02（密度计的分辨率），推算后得到的固体成分含量范围在 36-72% 之间。

次应用于阿布扎比。该系统可以测量混合水与水泥浆的比例，并以此为基础计算固体成分含量（*上图*）。虽然 SFM 技术是专为轻质水泥浆固井作业而开发的，但其对于任意密度的水泥浆也同样有效。

SFM 技术允许固井工作队在连续混合并且泵入大量水泥浆的同时，保持期望获得的水泥浆性质。该系统需要一个水泥浆流量计、一个额外的传感器和一个水流量计。其中，水泥浆流量计可以是现有的非放射性流量计，在固井工作装置中可以找到；传感器用来显示水泥浆在罐中的位置。这些新调整的设备可以容易地接入陆上或海上的混和装置中（*右图*）。当使用与传统的水泥浆混合完全相同的步骤（过程）时，以Windows为基础的软件可以帮助固井工作人员监测、调整混和物（*下页*）。在油田使用 SFM 系统时，98%（体积百分比）的水泥浆，固体成分含量可以保持在预定目标上下 2% 之内。

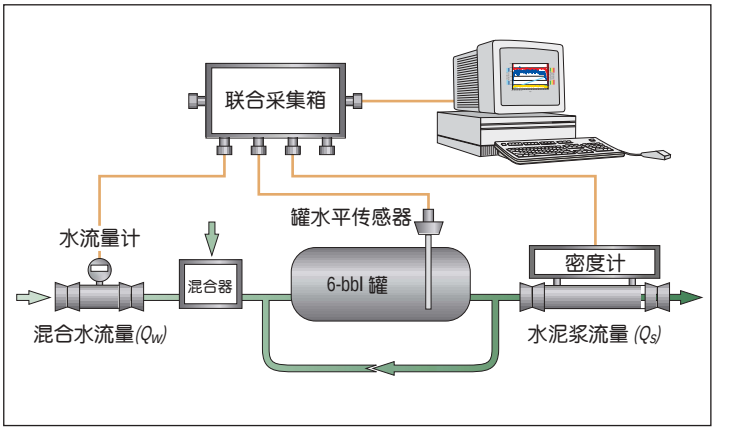
目前，已有55项工程使用了SFM技术，其中有 39 项采用了 LiteCRETE 水泥浆，这些工程分别在中东、墨西哥、印度尼西亚以及法国。SFM系统适用了全球范围内传统或 LiteCRETE 水泥浆。

轻质固井水泥的评价

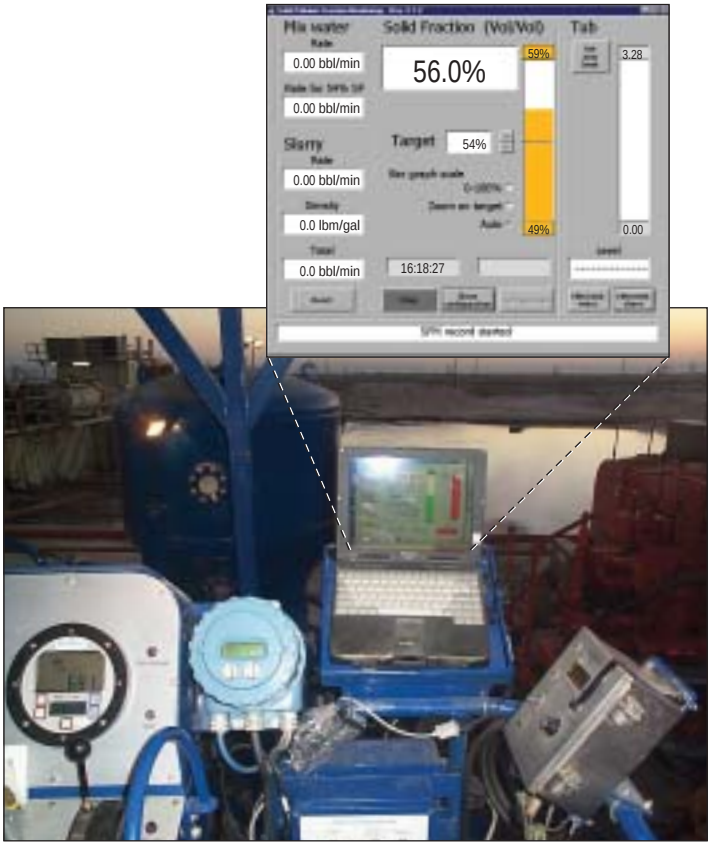
在水泥浆混和与注入过程中，质量控制是至关重要的，而固结水泥的评价却是其实现长期层间封隔性的关键。水泥浆注入井下开始固结后，对固结水泥的评价就显得十分重要。对固结水泥进行评价可以确定固结水泥是否已经被成功地置于所需的位置，而且起到了应起的作用。大多数情况下，固结水泥用以支撑套管柱，封隔含水层和含油气层，并且保护套管免受腐蚀。简单的水力学测试包括套管鞋压力测试、“干”中途测试（用以确定固结水泥是否能防止流体流入井眼）以及射孔测试（用以检测环空的连通情况），但是简单的水力学测试不能保证满足所有要求。因此，开发了用来确定固结水泥声波性质的测井仪器，用来对固结后的水泥进行评价。[8]

声波测井通常通过测定井眼周围声波的传播情况来评价固井工程质量。超声波测井仪测定的是套管后物质的声阻抗（即物质的密度乘以纵波的速度）。多数情况下，固体物质（即固结后的水泥）表现出高于液体物质的声阻抗，这里的液体物质包括泥浆和未固结的水泥浆。因此，超声波测井仪可以根据声阻抗的差别来区分固体与液体。如果固体物质均匀地分布于套管周围，且长度超过了所要求的下限值，那么水力学上的封隔性是有保证的。

声速测井仪的原理有所不同，它所依据的是声波沿套管传播的原理。声速测井仪对套管后固体物质的声阻抗有响应。胶结在套管上的物质的声阻抗越高，波的衰减就越多。但是，波的衰减还受其它参数的影响，例如，套管周围固体、液体物质的分布情况会影响波的衰减。因此，解释利用声速测井仪测得的波的衰减情况，要比解释利用超声波测井仪测得的声学图件困难得多。当测定固结后的轻质水泥时，声速测井仪与声波测井仪的联合使用是最有效的，因为声速测井仪的变密度测井是唯一能够提供固结水泥与地层之间信息的方法。



> SFM 设备。SFM 设备可以在数小时内对固井设备进行改装。



> 实时质量控制。装有SFM软件的计算机（*底图*）能以一种方便、可读的格式随时显示重要数据（*顶图*）。

声波测井包括水泥胶结测井，例如CBT(水泥胶结仪)，它可以利用平行于套管的波的传播情况评价套管与水泥之间的固结情况。发射器发送声能，接收器接收通过套管、固结水泥、地层、钻井泥浆或这些物质的混合物传播的波的返回信号。良好的声速测井响应包括振幅或衰减信号与套管后固结水泥声阻抗相一致，套管波信号在变密度测井中不存在或非常弱，以及地层波信号在变密度测井中好或很强。

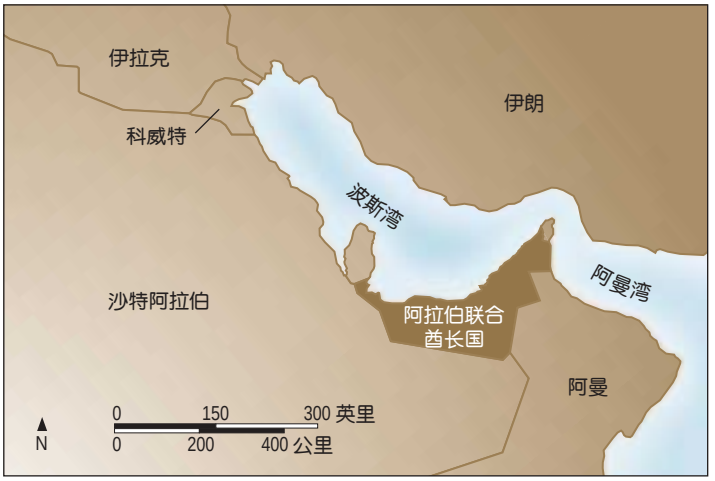
超声波测井仪包括USI(超声成像仪)和CET(水泥评价仪)。这些装置可以发射与套管方向垂直传播的高频波。返回接收器的波的能量取决于套管、井眼中的流体，以及套管与地层之间环空中物质的声阻抗。由于套管以及井眼中流体的声阻抗已知，所以可以推算环空中物质的声阻抗。据此，可以评价套管与固结水泥之间的固结情况。声阻抗的测量值通常以兆瑞利（Mrayl）为单位，即10^6kg/m^{2}s。好的超声波响应表现为套管周围物质的波阻抗高于门限值。当在所要求的最小长度段内均可得到良好响应时，则认为位于其下方的地层与上覆地层在水力学上是彼此分隔的。

成功地进行固井评价的关键是了解固结水泥浆的性质。可以通过给定的混合物推测这些性质。LiteCRETE水泥浆并非100%由颗粒物质组成。当密度为1.90g/cm^3（15.8lbm/gal）时，其声阻抗低比传统的Portland水泥浆系列低。这种密度的水泥浆通常用于固结生产套管。由于固、液间声阻抗差别的减小，当密度为1.9g/cm^{3}时，LiteCRETE水泥比传统的Portland水泥更难测定。由于密度对声阻抗的影响大于速度对声阻抗的影响，因此水泥密度越低，问题越严重。但是，LiteCRETE水泥却有较高的声阻抗，这是由于在相同密度下，LiteCRETE水泥浆的固体物质含量比传统的水泥高。因此，在相同密度下，LiteCRETE水泥比任何其它的水泥都容易测定。

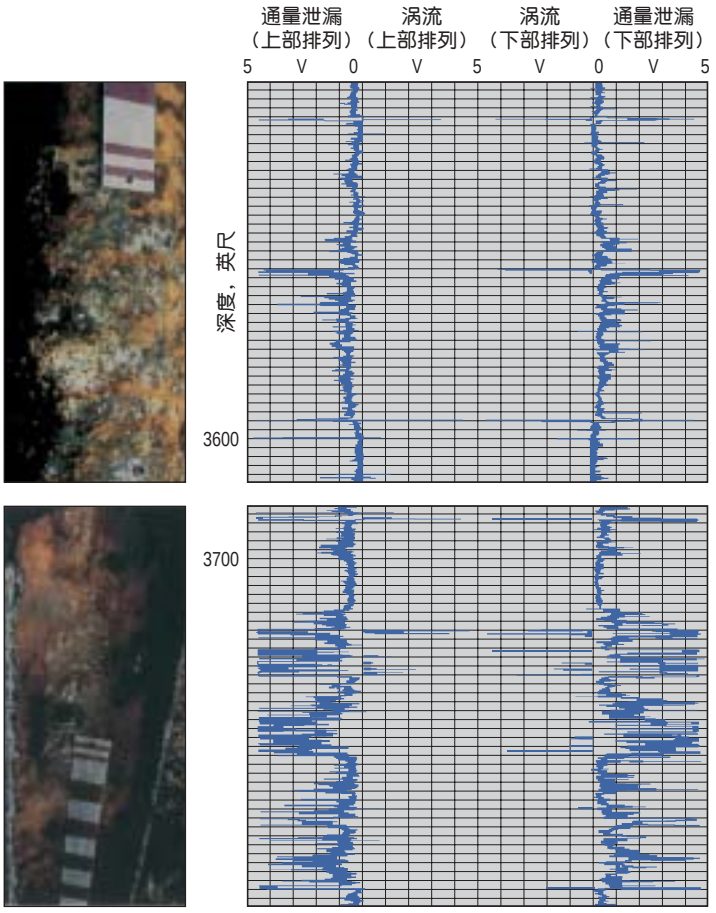
对于LiteCRETE水泥浆，有两个原因常常导致对其声学响应产生错误解释。其一，人们期望密度为1.9g/cm^{3}时，LiteCRETE水泥的响应能够同传统的Portland水泥一样好，其理由是人们错误地以为这两个系列的水泥压缩强度几乎相同，所以就应当有同样好的响应。但事实上，声波测井的响应同压缩强度无关。其二是，某些仪器的缺省背景值是根据密度为1.9g/cm^{3}的传统Portland水泥系列得到的。为了避免对轻质水泥浆的声波测井响应解释错误，在进行测井作业前，根据给定的时间、密度和温度，可以确定水泥的声阻抗。

利用超声波固井分析仪（UCA），可以测定固结水泥中波的传播时间，从传播时间可以估算出固结水泥的声阻抗。固井设计与评价软件（例如CemCADE程序中的CBL Adviser模块）可以在进行固井作业前对声阻抗进行估计。据此，可以重新刻度测井记录，并且在测井记录的解释中，可以简单地将测量值看作是声阻抗的反映。对于超声波测井而言，重要的是将液体、固体间声阻抗的门限值恰当地设置成为被驱替的泥浆与套管后固结水泥浆的声阻抗的函数。对于声波测井而言，CBL Adviser模块常用来预测100%固结时的振幅或

8. 有关固井评价更多信息请参见：Jutten J 和 Morriss S：“Cement Job Evaluation”，in Nelson EB：Well Cementing。美国得克萨斯州Sugar Land，斯伦贝谢 Dowell（1990年）：16-1—16-44。



> 中东。中东一些碳酸盐岩是油气富集区，但易于发生泥浆的循环漏失。



> 腐蚀的证据。当腐蚀性流体流经渗透性固结水泥时，发生外部腐蚀。从套管的照片（*左侧*）以及PAL（管柱分析测井）记录（*右侧*）可以看出腐蚀的情况。通量泄露是总腐蚀情况的指标，涡流泄露是内部腐蚀的标志。除了3602英尺处的小孔外，上部套管的腐蚀情况较弱。在下部套管中，外部腐蚀严重，表现为3712-3744英尺段的高通量泄露值，在相同层段内，内部腐蚀则相对较轻。

衰减情况，并且可以将其与实测值进行对比。

或许，初次固井作业是否合格是固井评价获取的最重要信息，因为这是决定是否有必要进行补充固井作业的依据。在极易发生循环漏失的地区，“合格”的概念有可能是指关键层位的固结，也有可能是指全井段或到前一套管鞋处的100%胶结。

阿布扎比松软地层中的防腐蚀情况

阿拉伯联合酋长国阿布扎比的Simsima与Umm El Radhuma地层由松软的碳酸盐岩组成，在钻井与固井作业中易发生大规模的泥浆循环漏失（*左上图*）。阿布扎比陆上石油作业公司（ADCO）对这些问题以及其它的一些地方性规定进行了讨论，并且采用了特定的钻井设计与井液方案，使泥浆的循环漏失与套管的腐蚀问题降低到了最小程度。[9]

如果水泥环没有完全隔离和保护套管，腐蚀性的地层盐水会对套管造成破坏（*左图*）。传统的做法是分两阶段固结套管，如果固井水泥没有达到地表，还要实行顶部作业。然而，为了达到长期封隔的目的，阶段作业与顶部作业都不够理想。阶段固井作业非常复杂而且失败的几率很大。阶段固井工具与滑动套管相似，是易于发生腐蚀的薄弱环节。在油井寿命后期，阶段固井工具容易发生泄露。

在单阶段固井作业中，注入水泥浆直至地表是最好的方法，因为这样不但可以消除由阶段固井工具引起的潜在泄露危险，而且可以消除不合格的顶部作业带来的影响（如泥浆呈线状或辐射状覆盖套管）。选择高质量的初次固井水泥具有实际的意义，因为这样可以减少补救固井作业的需要。对于油井废弃后

的环境保护而言，选择高质量的固井水泥也同样重要，因为固结后的水泥可以封隔淡水层、阻止流体向地表运移，并且在油井废弃后，保持套管与固结水泥以及固结水泥与地层之间的紧密接合。[10] 正是出于这一考虑，ADCO 认为油井的寿命为 50 年。

在Simsima和Umm El Radhuma地层中，由于循环漏失时有发生，所以在特定井段注入水泥非常困难。密度为8.0lbm/gal（0.96g/cm³）（低于水的密度）的油基泥浆或充气泥浆可以将钻井过程中的泥浆漏失降低到最小程度。为了避免固井作业中的水泥浆漏失，必须使用轻质固井水泥。而且水泥固结后必须具有低渗透率，以便将潜在的套管腐蚀危险降低到最低。

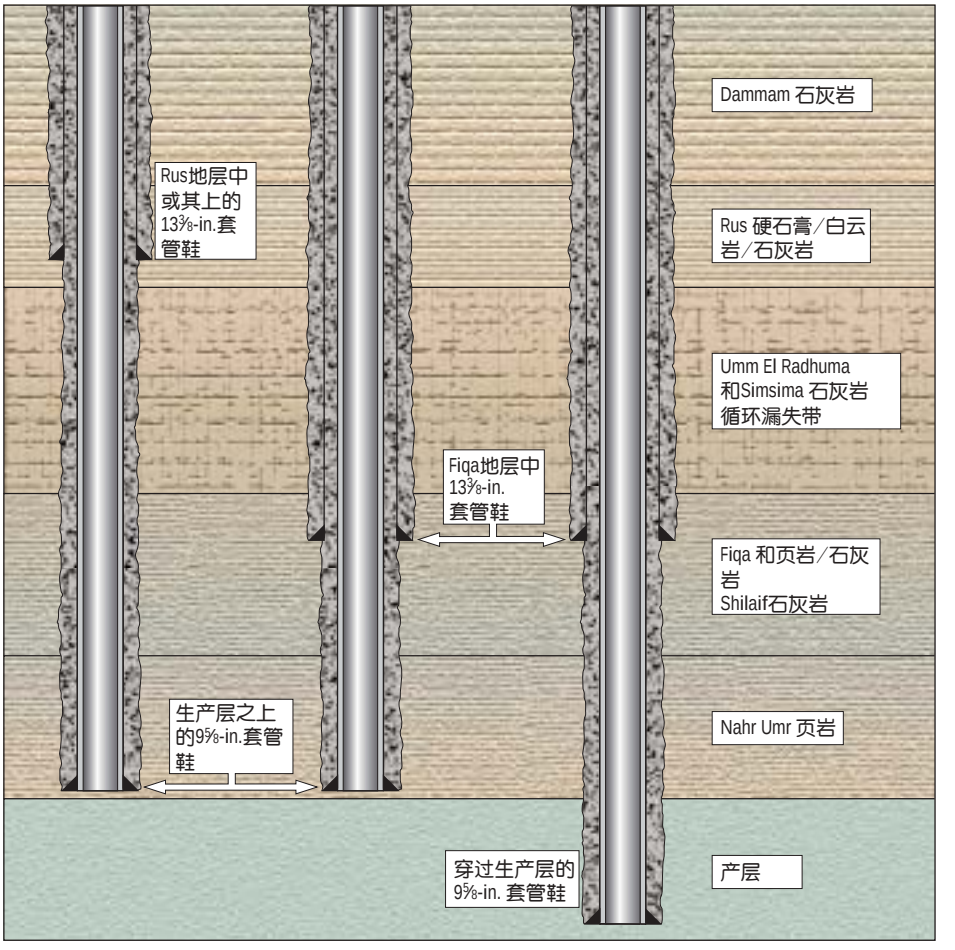
ADCO 根据井设计目的不同（次要开发井、重要开发井、气井或评价井），采用不同的下套管及固井方案（*下图*）。LiteCRETE 系列水泥的应用是每一个固井方案的关键，这是因为，这样的水泥可以在不引起地层破裂或诱发泥浆漏失的情况下，直接注入井中直至地表。固结后的水泥具有低的渗透率以及很小的酸溶性，可以使套管免受腐蚀。

因为每一项固井作业注入井中的水泥浆体积都可能超过500bbl（80m³），所以持续混合水泥浆的能力十分重要。SFM 系统首次在阿布扎比得到使用，到 2001 年 6 月，已有 27 项固井作业中采用了 LiteCRETE 水泥浆，其中 25 项作业中均有水泥浆回返地表。

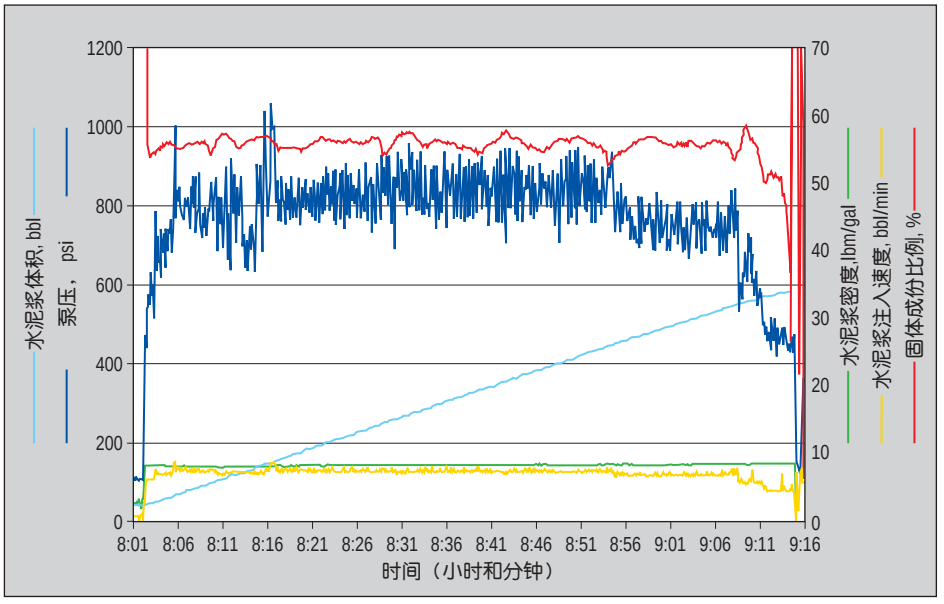
在阿布扎比，有许多成功应用 LiteCRETE 水泥作业的实例。例如一口井要求在$12^1/_4$英寸的裸眼井中，在1670-8355英尺(509-2547米)的井段中下$9^5/_8$英寸的套管。ADCO 希望在一个单阶段作业中固结套管。建议将轻质的 LiteCRETE水泥浆为前置泥浆注入井中，

9. Mukhalalaty T， Al-Suwaidi A 和 Shaheen M：“Increasing Well Life Cycle by Eliminating the Multistage Cementer and Utilizing a Light Weight High Performance Slurry，” SPE 53283，发表于中东石油展览会，巴林，1999 年 2 月 20-23 日。

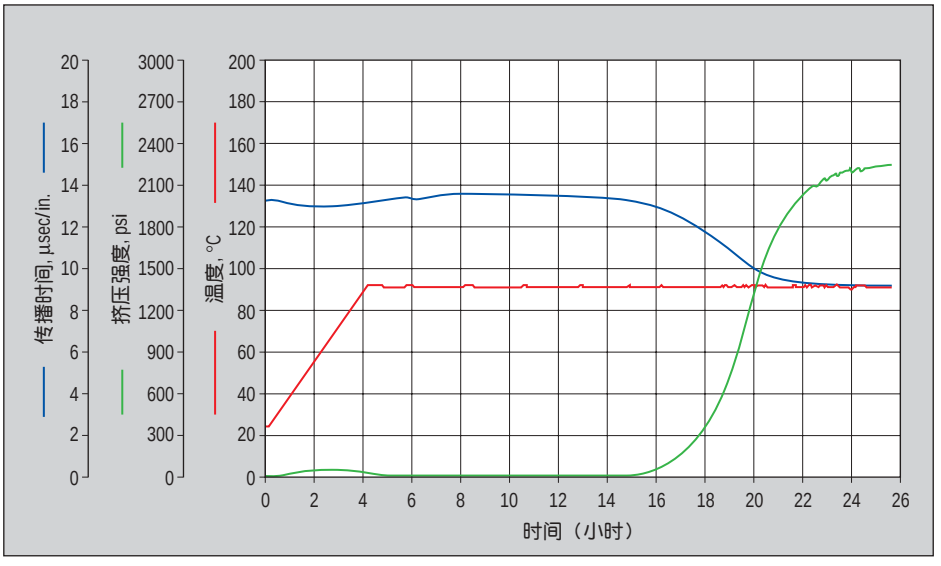
10. 关于永久废弃井固井的更多信息，请参阅 Slater HJ Stiles DA 和 Chmilowski W：“Successful Sealing of Vent Flows with Ultra-Low-Rate Cement Squeeze Technique，” SPE/IADC 67775，发表于 SPE/IADC 钻井会议和展览会，荷兰阿姆斯特丹，2001 年 3 月。



> 阿布扎比特定的套管及固井设计。在开发井中，$13^3/_8$英寸的套管可以下至 Dammam 地层（*左*）或 Simsima 与 Umm El Radhuma 地层之下（*中*）。$9^5/_8$英寸的生产套管下至 Nahr Umr 页岩之下，该套页岩对水基泥浆非常敏感，要求有高的静水压力控制。在两个设计中，最大的难题是获得尽可能好的固井质量。对气井或评价井，在钻穿生产层之前，将$13^3/_8$英寸的套管下至 Simsima 与 Umm El Radhuma 地层之下（*右*）。在以上所有井中，轻质 LiteCRETE 水泥都可以注入井中直至回返地表。这说明，水泥浆在具备完全的层间封隔性的同时，解决了水泥浆的循环漏失问题。



> SFM技术确保了稳定一致的固体成份含量。在阿布扎比，固井要求使用轻质水泥浆以避免循环漏失。在本例中，先期注入的水泥浆（绿色曲线）密度保持不变，且低于10lbm/gal（1.20g/cm³）。同时，固体成分含量（红色曲线）也保持相对稳定。



> 超轻质水泥浆固结过程中压缩强度的变化。密度为8.3-9.5lbm/gal的LiteCRETE水泥浆16小时内开始固结，最终其压缩强度在2100psi（14.5MPa）之上。

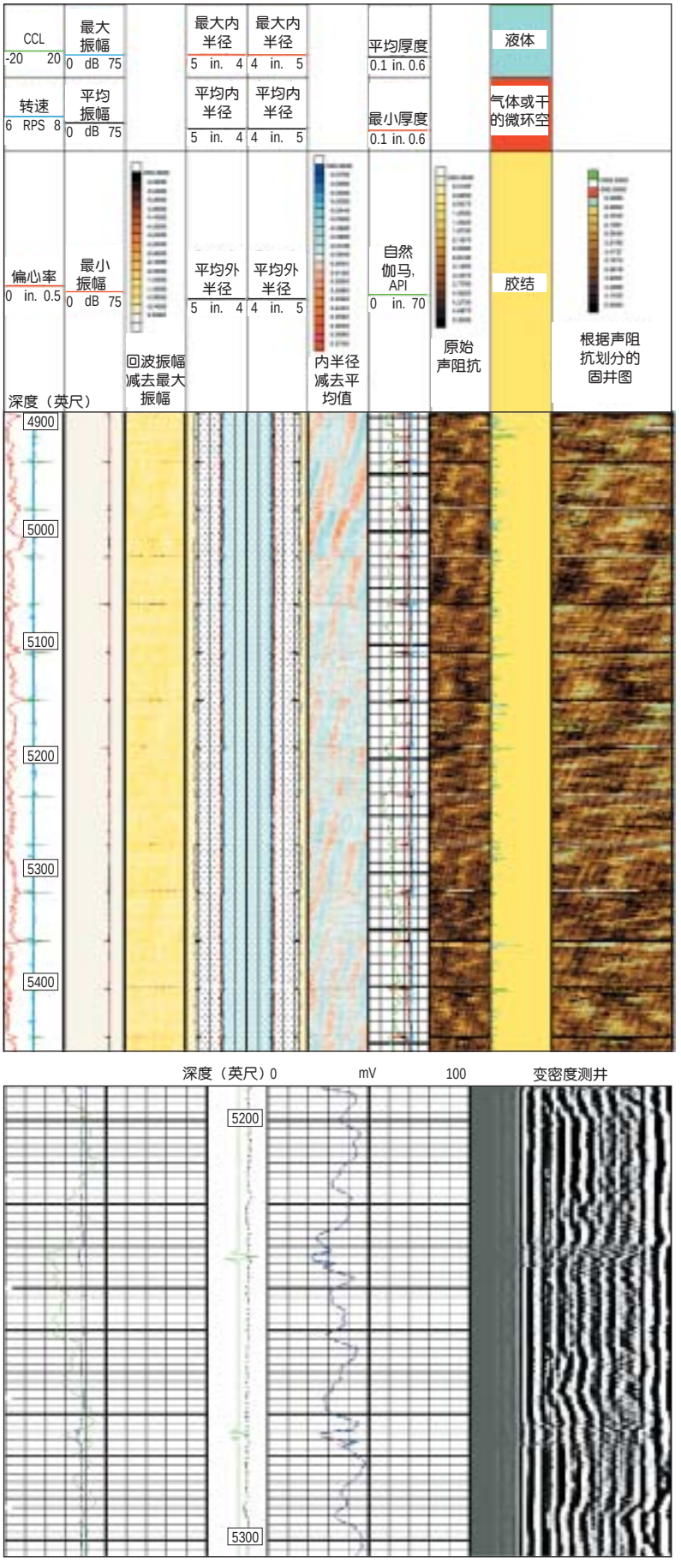
其混合密度为8.3-9.5lbm/gal（0.99-1.14g/cm³）。[11]SFM技术可以使作业人员将固体成分含量控制在55%左右（左图）。末段水泥浆使用的是15.8lbm/gal的G级Portland水泥浆。两种水泥浆均以12bbl/min（1.9m³/min）的速度注入井中，没有发生漏失，且有30bbl（4.7m³）的水泥浆回返地表。[12]底部的固结性测试非常成功，压力达1650psi（11.4MPa）。

为了保证层间的封隔性及套管的覆盖程度，联合采用了USI、CBT和Variable Density测井仪，用以证实固井质量。但是为了在评价中有合理的界限值来确定什么是好的固井质量，必须在测井前估算出LiteCRETE水泥浆在固井图件中可能的读数。采用UCA仪测定LiteCRETE水泥浆的声阻抗，在测井前，利用CemCADE固井模拟软件估算了LiteCRETE水泥浆100%固结以及80%固结时的CBT振幅。测井结果清楚地显示，高质量的水泥充填于环形空间之中，并覆盖于整个层（下页），其结果也符合设计阶段的预测。22小时内，LiteCRETRE水泥的压缩强度超过了2100psi（14.5MPa）（左下图）。

11. “前置水泥浆”指在首次固井作业中，首先被注入的水泥浆。“末段水泥浆”是指首次固井作业中最后注入的水泥浆。通常末段水泥浆用于固结生产层，而且比前置水泥浆重。

12. 水泥浆的回返是固井质量的标志，也是唯一可以反映水泥浆漏失的标志。在钻井作业中，如果注入压力保持在预期的压力范围之内，可以观察到水泥浆的回返，那么就没有固井质量问题；如果观察不到水泥浆的回返，或者仅能观察到部分回返，那么就说明固井作业中有水泥浆漏失现象发生。此例中，固结水泥浆没有达到计划的高度，有必要进行补救固井作业。

关于固井作业评价的更多信息请参阅：Piot BM与Loizzo M：“Reviving the Job Signature Concept for Better Quality Cement Jobs，”IADC/SPE 39350，发表于IADC/SPE钻井会议，美国得克萨斯州达拉斯，1998年3月3-6日。



^ 阿布扎比的固井评价。固井图中，第九道为USI测井*（上部）*，由此可以看出，水泥浆均匀地分布于套管周围；第一道所示为仪器偏心率（红色）与套管接箍定位器（蓝色）；第二道是处理过的USI信号；第三道显示的是振幅；第四道说明了套管直径；第五道是套管直径图；第六道中蓝色曲线为最大套管厚度，红色曲线为最小套管厚度，黑色曲线为平均厚度，自然伽马曲线为绿色；第七道显示声阻抗大约为4Mrayal；胶结指数在第八道中表示。

CBT（水泥胶结仪）的数据*（下部）*包括第一道所示的自然伽马曲线（绿色）与传播时间（蓝色和红色），第二道所示的套管接箍定位器（绿色）与电缆张力（黑色），第三道所示的振幅，以及第四道所示的变密度测井曲线。

振幅为35毫伏，比这种水泥浆和套管组合预计的10毫伏要高。这样的响应通常出现在有窜槽、水泥浆污染或套管与固结泥浆间有微小的环形空隙的情况下。USI中显示的连续水泥浆分布排除了窜槽存在的可能性。声阻抗比在实验室测得的3 Mrayal略高，这说明不可能是水泥浆污染，因为水泥浆污染通常使声阻抗降低。因此，CBT响应反映的是套管与固结水泥间微小环空的存在。

这一微小环空是水泥浆固结后，压力测试时产生的。此例清楚地表明，CBT与USI联合使用非常重要，这是因为USI较之于CBT而言，对流体充填的微小环空较不敏感。变密度测井中出现了地层信号，在5232英尺及5274英尺处最明显。这说明，固井水泥至少部分与地层相固结。

> 墨西哥 Cantarell 油田。

在墨西哥的超轻质水泥固井作业

位于墨西哥近海Campeche湾的超大型Cantarell油田是墨西哥最大的油田（*上图*）。该油田发现于1979年，日产油约160万桶（407000m³），占墨西哥原油日产量的42%。其原油产自存在大量裂缝、孔洞的古新统及上白垩系地层。该油田的天然气产量也占墨西哥近海气产量的30%。由于易于产生诱发裂缝，该油田钻井及固井作业中泥浆的循环漏失对PEMEX勘探开采公司来说，是一个重大难题。在地层与套管之间的环空中注入水泥浆并使具有足够的高度非常困难，因此，存在层间封隔不完全的可能性。

利用传统水泥尝试了许多固井技术，其结果都不令人完全满意。由于传统作业中前置水泥浆及末段水泥浆注入不足，导致了补救固井作业费用巨大。有时，甚至在补救固井作业之后，水泥还不能完全固结下了套管的地层。附加的衬管顶部封隔器能够使衬管的顶部不再需要补救固井作业，但是剩余层段的泥浆注入仍很困难，甚至使用两种水泥浆，情况也是如此。使用单一的1.35g/cm³（11.3lbm/gal）的传统水泥浆进行操作，使得裸露的地层封隔不完全，并且环空的水泥柱也上升缓慢。

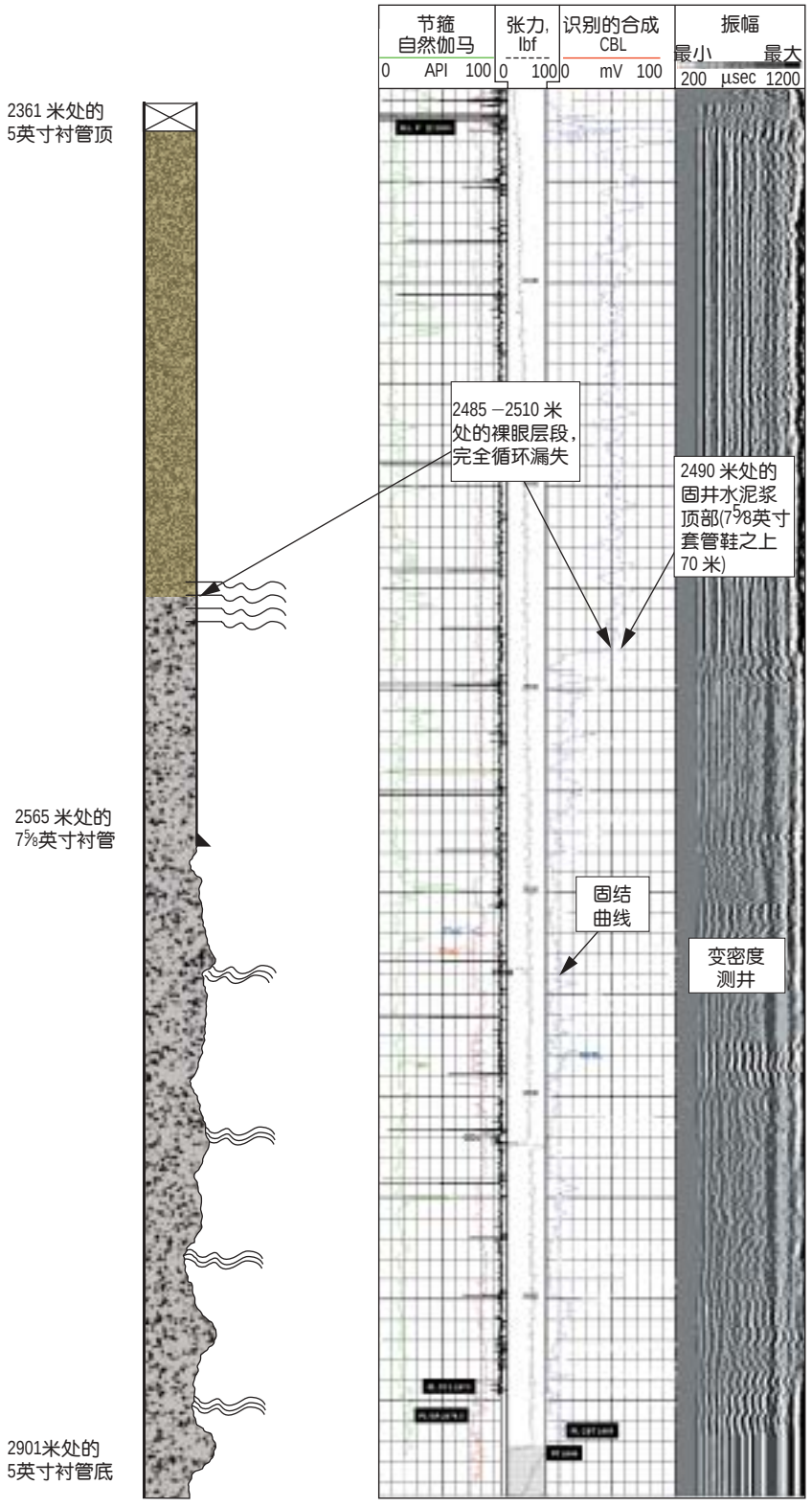
La Brecha产层的破裂压力梯度为5.88kPa/m（0.26psi/ft），地层渗透率高达5达西。钻井中使用的是密度为0.89g/cm³(7.4lbm/gal)，65%的柴油乳剂钻井液。循环漏失非常严重，钻井过程中根本没有流体返回地表。低密度的钻井液有助于将钻井岩屑带入天然的裂缝孔洞之中，这将限制固井作业中的水泥浆漏失。由于钻井及固井过程中没有别的方法使井得到控制，所以在环空注入海水以控制钻进过程中气体的运移。

为了减小水泥浆向地层中的进一步漏失，采用密度与钻井液相近的固井水泥是必要的。由于在如此低的密度条件下，泡沫水泥浆固结后性质不理想，所以不能使用泡沫水泥浆。LiteCRETE水泥3小时内就可以稠化，16小时内就可达到2000psi（13.8MPa）的压缩强度。另外，这种水泥浆还具有相对低的漏失量（26 cm³/30分）与低的密度，这都是作业人员所需要的。

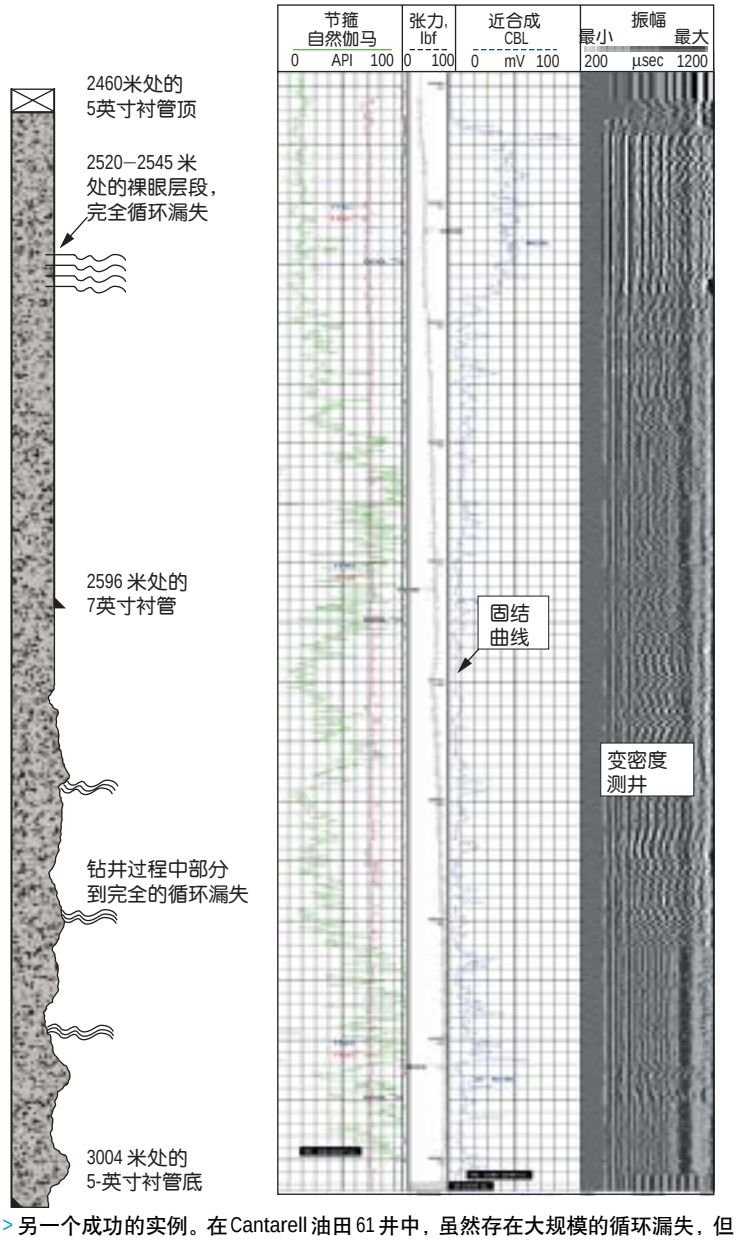
超轻质水泥在Cantarell油田的3口井中得到了成功应用。例如，在2091井中，就使用了LiteCRETE水泥。该井井深2905米（9531英尺），并且为了发现更多的石油储量，井斜达56°。该井钻遇数个循环漏失层段，漏失的钻井液达15300bbl（2430m³）。然而使用1.1g/cm³的LiteCRETE水泥，使5英寸的衬管得以成功地固结（*下页*）。在连续混合水泥浆以及水泥浆的质量控制过程中采用了SFM技术。在该油田中，固井水泥浆首次完全充满了环空，这在如此困难的环境下，是一个巨大的成功。套管鞋测试成功，压力达500psi（3447kPa）。

在Cantarell油田53D井钻井过程中，钻井液漏失量达7100bbl（1130m³），使用1.1g/cm³的LiteCRETE水泥成功地固结了穿过数个循环漏失层段的$9^5/_8$英寸衬管。SFM系统确保了固井水泥浆具有53%的固体成分含量，并且均一、稳定、容易注入井中。在Cantarell油田的井中，通常没有水泥浆能够回返地表，但是，在该项作业中，却观察到了水泥浆的部分回返。

第三口井是Cantarell油田的61井，该井在钻井液漏失14800bbl（2350 m³）



^ Cantarell油田2091井中生产层的封隔。利用CBT对固井质量进行评价，结果表明固井水泥覆盖了5英寸衬管之后的全部层段，这在Cantarell油田还是第一次，如井眼示意图（*左*）与测井图（*右*）所示。测井图中第一道显示了自然伽马（绿色）、传播时间（蓝色和红色），以及套管接箍定位器（黑色）；电缆张力在第二道中显示；第三道是振幅，在2490米以下，振幅相对低，说明套管后存在固井水泥浆；变密度测井数据在第四道中显示，在2490米以下，地层信号弱或者不存在，同样说明了套管后存在固井水泥。在2490米之上，振幅较高，套管信号强，说明2490米以上没有固井水泥存在。因为井斜达56°，因此无法在整个井段内进行水泥胶结测井。



> 另一个成功的实例。在Cantarell油田61井中，虽然存在大规模的循环漏失，但固井水泥浆在5英寸衬管中也具有相当的高度。测井图中第一道显示了自然伽马（绿色）、传播时间（蓝色和红色），以及套管接箍定位器（黑色）；电缆张力在第二道中显示；第三道显示了振幅；变密度测井数据在第四道中显示。振幅在2550米之上显著增加，变密度测井数据也在2550米上、下发生突然变化，这说明固井水泥浆顶部在2550米处。

后，使用1.1g/cm³的LiteCRETE水泥浆固结了5英寸衬管。在衬管顶部测定了固井情况。CBT测井显示，固井后的层段，固结率高于90%（上图）。SFM技术又一次被应用于混合水泥浆的作业过程，并且在该作业中保持了固体成分含量及密度的稳定。

PEMEX计划在墨西哥Cantarell油田再钻90口井。而且，在未来的另一个项目（Cantarell油田下部Sihil圈闭深层储量开发）中应用超轻水泥固井技术，也可以使该项目获益。

杜绝多期固井

最佳的固井方法是杜绝多期固井作业，以减少补救固井作业。采用轻质水泥还可获得优良的层间封隔性，从而解决许多问题。在中东的许多油田中，固井是非常困难的，尤其困难的是使水泥浆回返地表。碳酸盐岩地层中存在水泥浆循环漏失现象，并且地层破裂压力低，所以必须使用轻质固井水泥。地层破裂压力梯度低至8.2lbm/gal，水柱也会引起地层的破裂。

更为麻烦的是，有些地层中如果水泥封隔不充分，地层水就有可能腐蚀套管。

与其他任何地区一样，在中东对作业人员来说，平衡费用与质量是非常重要的。补救固井作业会使费用增加，并且使油田作业进一步复杂化。近年来，由于CemCRETE技术能够提供低密度、高质量的固井水泥，所以已被作业人员采用。

轻质LiteCRETE水泥可以克服套管腐蚀的问题，并且取得良好的层间封隔性，避免在循环漏失层段或松软地层中出现窜流。轻质水泥还能使单阶段固井成为可能。这种单阶段固井要求采用固结后具有良好压缩强度及低渗透率的固井水泥，以防止流体进入地层。

在很多情况下，未固结的环空或松软地层的长度很大，经常超过3500英尺（1067米），所以必须进行两阶段固井作业。例如，在一口井中，第一阶段的固井作业在注入71bbl（11m³）8.2lbm/gal的LiteCRETE固井水泥浆后，又注入了15.8lbm/gal（1.9g/cm³）的末段水泥浆。在第二阶段中，先注入了240bbl（38m³）的8.2lbm/gal的LiteCRETE水泥浆，然后，又

13. 火山灰固井水泥是由火山活动或煤的燃烧过程中产生的硅质物质制成的。

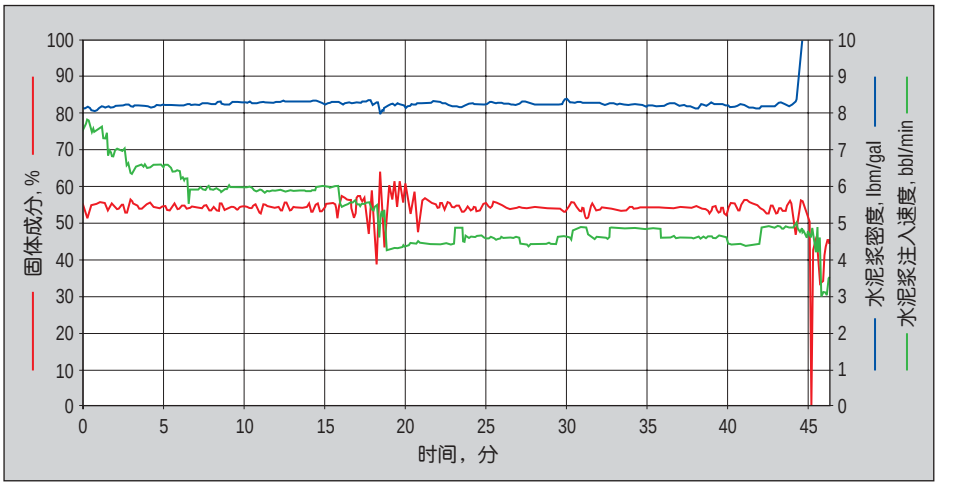
14. 关于水泥系统新进展的更多信息请参阅：Le Roy-Delage S，Baumgarte C，Thiercelin M和Vidick B："New Cement Systems for Durable Zonal Isolation，"IADC/SPE 59132，发表于IADC/SPE钻井会议，美国路易斯安那州新奥尔良，2000年2月23-25日。

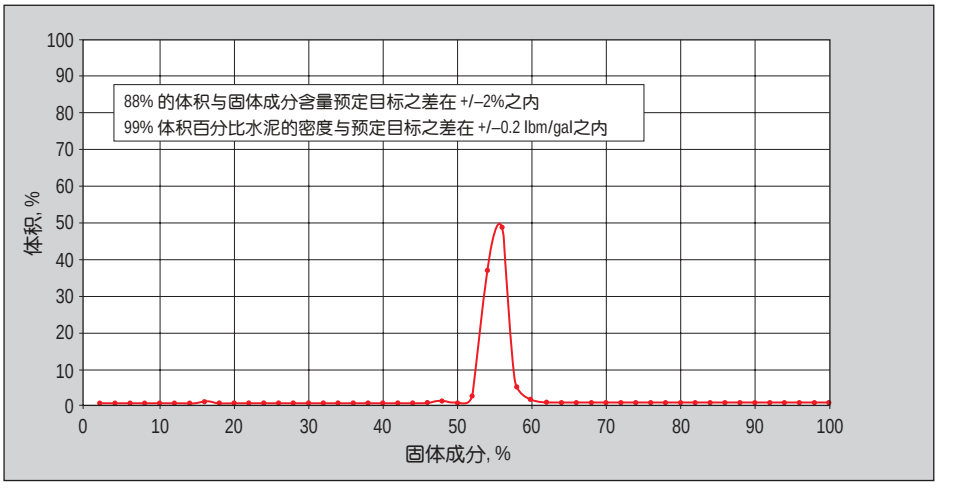
Baumgarte C，Thiercelin M和Klaus D："Case Studies of Expanding Cement to Prevent Microannular Formation，"SPE 56535，发表于SPE年度技术会议和展览会，美国得克萨斯州休斯敦，1999年10月3-6日。

Thiercelin MJ，Dargaud B，Baret JF和Rodriguez WJ："Cement Design Based on Cement Mechanical Response，"SPE 38598，发表于SPE年度技术会议和展览会，美国得克萨斯州圣安东尼奥，1997年10月5-8日。

15. Mohammedi N，Ferri A和Piot B："Deepwater Wells Benefit from Cold-Temperature Cements，"世界石油，222卷，第4期（2001年4月）：86，88和91。

Piot B，Ferri A，Mananga S-P，Kalabare C和Viela D："West Africa Deepwater Wells Benefit from Low-Temperature Cements，"SPE/IADC 67774，发表于SPE/IADC钻井会议和展览会，荷兰阿姆斯特丹，2001年2月27日至3月1日。





> 按照设计要求进行作业。SFM 技术（*上图*）在固井作业过程中，可以帮助油田工程师将水泥的固体成分含量保持在预定的 54% 左右（*下图*）

注入了 131bbl（21m³）的密度为 12.5-15.8lbm/gal（1.5-1.9 g/cm³）的常规固井水泥浆，固井作业过程顺利，并且有部分水泥浆回返地表。顶部作业中仅注入 20bbl（3m³）的水泥浆就与地表平齐。这说明先期作业后，LiteCRETE 水泥浆已具有相当的高度。以前，要使水泥浆的高度与地面平齐，必须经过 3-4 次的顶部作业。24 小时后，LiteCRETE 水泥浆具有 1175psi（8101kPa）的压缩强度。

在另一口井中，从 3368 英尺（1027 米）直至地表的 $13^3/_8$ 英寸的套管分两阶段被固结。在此之前，类似的固井作业需要经过三期作业。固井的主要目的是为了封隔浅层容易发生循环漏失的层段。

因为在钻井作业中采用了 8.6lbm/gal（1.03g/cm³）的钻井液，所以固井中首先注入 315bbl（50m³）密度为 8.4lbm/gal（1.00g/cm³）的 LiteCRETE 固井水泥浆，此后又注入了 30bbl（4.7m³）密度为 15.8lbm/gal 的常规 G 级 Portland 固井水泥浆。固井作业与设计完全一致。第一阶段中 98% 的前置水泥浆与 100% 的末段水泥浆回返地表。采用 SFM 技术（*上图*）将固体成分含量固定在预定的 54% 左右。24 小时后，温度为 119°F（48°C）的状态下，LiteCRETE 固井水泥浆的压缩强度高达 1300psi（8963kPa）。第二阶段中使用了 152 bbl（24m³）的密度为 13.5lbm/gal（1.62g/cm³）的火山灰固井水泥浆，100% 回返地表。[13]

未来发展

在其它的轻质或超轻质固井水泥不适用的环境中，LiteCRETE 水泥技术取得了成功。采用这种水泥，可以对深层段进行封隔，这些层段的固井作业不能使用密度比水重的水泥。到 2001 年 6 月，在欧洲、中东以及中美、南美地区，已有超过 35 项的 LiteCRETE 作业，其使用的水泥密度低于 10lbm/gal（1. 20g/cm³）。这些作业在连续混合水泥的过程中使用了新的 SFM 技术。应用该技术合成的水泥总体积超过 25000bbl（3970m³），作业过程中没有出现任何错误。

施工中控制粒径分布的成功，刺激了相关技术的发展，这些技术可以用于满足更多的固井作业的需要。新技术的采用提供了更坚固、更柔韧的固井水泥。[14]低温条件下的深水固井作业新技术正在发展之中，以适应极端困难的固井环境的要求。[15]高温条件下的固井作业仍是一个挑战，用于满足更为恶劣环境下特殊固井要求的研究工作正在进行之中。 —GMG

（翻译：李慧莉）