

水平井固井技术

编译：吴俊辉 张春明（大庆石油管理局钻井三公司）

习玉光（大庆石油管理局钻井一公司）

审校：孙庆仁（大庆石油管理局钻井三公司）

摘要 概述了世界上最长的 1 口水平井所采用的水泥浆体系的设计方法。英国多塞特郡南海岸 BP Amoco 公司的 Wytch 油田目前完成的 17 口井中均使用该水泥浆体系，无一需要二次固井（补注水泥），而且，声变测井证实所有储层部分都显示出满意的油层隔离。

主题词 固井 水泥浆体系 水平井技术

一、引言

自 1993 年 BP Amoco 开始在 Wytch 油田钻井施工以来，该区块所钻的最长水平段井为 1M-16-SP，该井基本数据如下：

- 预置 25m 的 26in 垂直导管
- 在上白垩系下入 260m 的 18 3/4in 套管
- 在总深度 11278m 下入 8 2 1/2in 套管——世界记录的最长水平段
- 7in 尾管下到垂深 1610m，总长度 10210m

二、前置冲洗液及隔离液

整个石油行业承认，提高排量及上返速度能有效地提高钻井液的流动，从而达到较好的第一、第二界面封固质量。在 Wytch 开发现场，所有的尾管固井都使用了大量的前置冲洗液及隔离液。尾管固井初期，采用加重隔离液（密度为钻井液及水泥浆平均值），随后采用油基冲洗液，该水泥浆提供坚实的基面，从而达到如 M08 及 M10 井的测井曲线所示的好的胶结指数，无需进行二次固井。以前该地区尾管固井的平均顶替速率为 6~8 bbl/min。在 M11 井（第一口尾管下到测深 10000m 的水平井）实施作业时注意到，顶替速率应该降低到 4bbl/min，从而保证在固井施工中不压漏地层。

Lockyeen Ryan 及 Gumng Ham 前期所做的工作显示，由于流速降低，窜槽程度增加（除非水被置换），而且，在紊流状态下，低黏度流体比高黏度流体更容易被顶替。基于这些及以前成功的经验，决定隔离液只采用水作为基液。这将导致使用

一系列不同密度及流态的流体，而且，密度不同将有助于注水泥顶替时的窜槽。

从 M11 井看，尾管固井前采用如下流体：考虑钻井过程采用了低毒性，含有固相的油基泥浆，首先，泵入 100bbl 黏度为 1~2cP 油基冲洗液，并采用紊流，甚至采用低泵速，这将提高泥浆在整个环空的流动，尤其在套管底部，泥浆极易被截留。油基隔离液稀释及顶替前部钻井液，有助于冲洗滤饼及“死泥浆”。油基冲洗液采用 75bbl 海水，再次采用紊流，这将有助于顶替环空底部的“死泥浆”。

75bbl 水基隔离液含有表面活性剂，采用重晶石粉将密度调整为钻井液及水泥浆平均值。该密度使环空钻井液密度能平衡地层的孔隙压力。表面活性剂有助于分散“死泥浆”的网状结构，从而更容易顶替，并且抑制任何不相容的成分存在于隔离液与泥浆中间。在垂井中，油基泥浆与水基冲洗液的不相容液体通常显示为类似“灰泥”的厚的混合物。严格来说，这些不相容成分将成为改变流速、不利于清洁井眼、形成环空堵塞的决定因素。

加重冲洗液后的 75bbl 海水冲洗液将降低地层当量密度。海水含有与加重隔离液一样的表面活性剂，从而形成紊流流速，不断地冲击环空中的死泥浆。

水泥浆之前的最后冲洗液为 75bbl 的水基隔离液，混合成与前期加重隔离液相同的模式，表面活性剂增加了相容性。流体的密度及表面活性剂的含量与前面一致。相容性有效地提高了环空表面的水润性，从而提高套管与地层的胶结能力。而且，隔离液的密度与流变性有助于抑制水泥浆与前期流体的混窜。

三、水泥浆设计

1、水泥型号与水泥浆密度

在 Wytch 开发现场所钻的井井深都不到 1800m，油藏温度为 150~165°F。水泥浆采用纯 G 级水泥与海水混合，密度 1.92g/cm³（16 lb/gal），抗压强度足可以满足正常的套管支撑。

2、测试温度

为了保证实验测试接近在水平段模拟循环温度，仅仅使用 API 温度来决定井底静止温度

(BHST)。井底循环温度基于假设：在垂直井眼的水平段，从地面泵送的冷液体将充分暴露于井底，从而达到井底温度，即所有液体在井底进行置换时都达到井底静止温度。这种模拟的实验室工作在大气（地面条件）和井底静止温度进行，这种假设通过应用计算机温度模拟器得以实现。

模拟开始时，假设井眼处于静止状态。在这种状态下，井底静止温度按“钻井程序”获得，为 165°F。计算机程序解释了在环空中按需要泵入水泥浆液体的过程。由于该工作从地面泵入低温度液体，从而导致井温下降，所以在模拟的后期，尾管部的温度接近 164°F，在这种状态下，井底循环温度基本相当于井底静止温度，实验测试温度也因此按 165°F（井底温度）计算。

3. 稠化时间

9 8in 套管及尾管要求延长稠化时间满足大体积的环空顶替。而且，真实井眼条件不同于模拟井眼，如需要较长的稠化时间，允许替速降低。建立水泥浆稠化时间安全底线的灵活性，对前期施工中未发现的地层漏点可以通过降低泵速来防止井漏，保证平衡地层压力。

一般来说，尾管水泥浆稠化时间为 10h，而施工时间为 5~7h。在 1M-16-SP 井的尾管施工中，水泥浆稠化时间为 15h，施工时间 8.5h。

4. 自由水

稠化时间较长的水泥浆，需要较长时间才能在环空中凝固，这将增加钻套管鞋时间或钻尾管悬挂器时间。延长水泥浆在井下的液态时间，可以提高自由水的形成以及固相颗粒的分离。为了达到整个环空封固效果，水平井比垂井的低失水要求更加严格。在垂井中自由水将运移到水泥环顶部，导致液体在水泥中形成通道，固井质量较差，除非自由水形成位置非常高，不会对垂直井产生较大的影响；在水平井中，水泥环顶部为整个井眼长度，任何自由水形成都会导致较差的胶结和井眼混窜。

Wytch 现场必须在井底静温下保证零失水，所通过的尾管水泥浆密度变化必须低于 1.5%。

5. 滤失量变化

在顶替中，水泥浆中的复合水流失将降低水泥浆的稠化时间，并且提高它的黏度。由于水泥浆失水将形成泥饼，自由水将进入渗透层。毫无疑问，这将改变计算的水泥浆流态变成不可预见的流态，并且导致在顶替中地层当量密度过高。在整个渗透区，滤饼将持续形成；过多的滤饼将使环空阻塞，阻止顶替。为了减少水泥浆失水进入渗透层，在 Wytch 现场尾管中使用的水泥浆在井底静温以及

1000 lb/in² 压力下，要求滤失量在 30min 内低于 80ml。这种情况下的水泥浆形成很薄的滤饼，从而防止了顶替过程中的进一步失水。

Wytch 现场开发为采油井，不需要考虑水泥浆中气体运移的控制。

6. 流变学

在环境温度和井底静止温度下使用标准的范氏 35 流变仪进行 API 流变性测定，其读数确定了一系列的流体特征。固井设备容易混灰，并且泵送过程将改变在管内和环空中所设计的流态。水泥浆的流体模式在井眼清洁条件下可以计算，并且固井时常常可以预测压力，因此该信息用来决定最优泵速以及进行隔离液设计。将转速带入计算机模拟程序中，从而产生上述关键的参考数据。

7. 其它检测

与井眼有关的是大的环容以及带来的所需大量水泥浆和环空隔离。为了保证施工后期使用的水泥性能与开始的水泥性能相同，尾浆的 API 稠化需要 2 次检测（取不同点进行检测）。只有 2 次检测处于误差之内，测试才完成。

四、顶替中的井眼考虑

水平井固井时的当量循环密度值似乎要明显高于垂直井。图 1 比较了水平井和相同封固段的垂井在使用相同流体相同速度顶替时当量密度的计算值（方块代表水平井、三角形代表垂井），垂井中大多显示出低的当量密度，但在顶替后期高于水平井多达 0.7 lb/gal。这主要是由于流体的水静力压力对垂井作用所产生的。

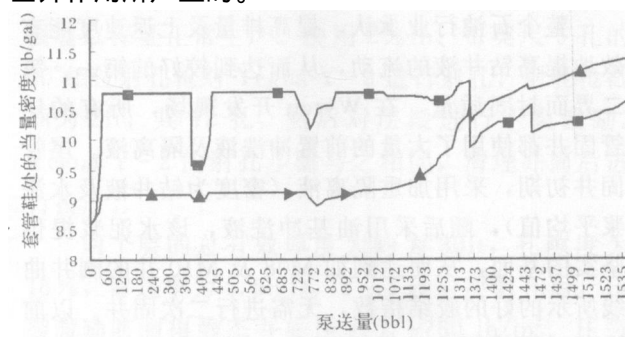


图 1 水平井与垂井地层当量密度对比曲线

然而在水平井中，尾管或套管中的流体重量是沿井眼长度分布的。在环空中应用扶正器将有助于套管居中，同时起到支撑套管中水泥重量的作用。在 Wytch 现场，尾管部分扶正器的用量在后期钻井中有所减少（见扶正器讨论部分），这将导致套管的额外重量产生偏心。这种井眼变化将使环空流道变窄，降低固相颗粒有效流动，“大肚子”内的

死泥浆将改变水泥浆前置隔离液的设计流态。为了克服对前置液的影响，程序中把隔离液设计成能有效冲洗环空井眼的流体，同时在需要的情况下，容易被水泥浆顶替。当水泥浆前导替出套管鞋进入环空时，它将经过井眼最高部分。随着水泥浆逐渐进入环空，尾管重量降低到最低点，此时，前期分离到套管低部的隔离液将被水泥浆顶替。由于封固套管和尾管时，地层当量密度影响很小，在可控条件下，水泥浆密度可以相对较高，从而经过低破裂压力梯度的地层。

五、套管扶正

考虑到井眼结构，API 中推荐使用 67 % 的扶正器，以求获得满意的固井施工。井眼大时，套管环空中泥浆和水泥浆很容易顶替。当固尾管时，许多单位和服务公司推荐使用 80 % 扶正器来保证高质量固井工作。井斜角的增大导致扶正器量增多，以达到提高居中度。同时，当套管靠近井眼一侧时，可压缩扶正器（弓型扶正器）必须能够克服套管重量。这种附加约束能产生恢复力，从而使每个扶正器部分举起贴近井壁的套管或尾管。特殊情况下，居中度的获得将低于推荐的最小 API 标准，可能只有 60 %。固体扶正器不仅用来恢复重量，而且更多是用在大井斜段或水平井段。

在 Wytch 现场中，尾管固井在重叠段使用占尾管长度 2 % 的刚性扶正器，达到 90 % 的居中度。由于水平段需要放置扶正器的量大，所以只在大井斜段间隔式地放置扶正器可以减少扶正器用量。1M-10-SP 井在固井时，每 6m 加放一只扶正器，大于推荐标准。在 M11 井和 M12 井中，每 24.4m 加放一只扶正器，并且在其余井中都保持该加放原则。这种对加放扶正器的改变是因为在长的尾管中增加活动阻力；同时，过多数量的扶正器将增大套管与井眼间的旋转摩擦力。

所使用的扶正器有一个螺旋叶片，起到了加强井眼清洁和水泥顶替的作用。这种设计提高了环空的流速，有利于冲洗泥饼。扶正器数量的减少通过使用隔离液和前置液得到补偿。

在 1M-16-SP 井中，7in 尾管的扶正器不同于以前尾管使用的低扭矩扶正器。该装置在扶正器的内、外测装有滚轴。外侧的滚轴为纵向，减少活动套管阻力。内侧滚轴允许套管在扶正器内活动。与刚性扶正器对比，该扶正器将滑动变为滚动，不会刮削井壁，并且允许尾管在整个固井作业中始终可以旋转。

六、活动套管

在循环及固井时，上下活动或旋转套管有助于

提高固井质量已经被广泛接受。活动套管提高钻屑与滤饼的移动，并且有助于打散泥浆静切力。这样做对于水平井或大井斜井同样重要。然而，基于不同的井眼形状，套管易于倾斜在井壁，所以克服由此带来的附加扭矩及阻力成为必然。

上下活动套管存在很大危险：大的阻力将阻止套管下放到井底，使尾管不能座在设计位置。同时，活动套管时可能出现过大的冲击压力。由于套管伸长，转盘上活动可能不会传至所需位置。这些情况在活动长的套管或尾管时将更危险。

套管严重偏心时，旋转套管比上下活动套管更有益。旋转套管需要足够的扭矩来克服井下力：套管重量（套管在无浮力或很小浮力下躺在井底的重量）、水泥浆在出套管前的重量以及扶正器相关的约束力等等。Wytch 现场在 1M-10-SP 井中 7in 尾管下入 8 2in 井眼时（平均尾管长度超过 2330m），在循环及固井时曾以 30r/min 旋转套管。数学模型可以预测出能够使用的工作参数，来保证套管联结。尾管悬挂器及地面装置按需要进行了相应设计。

七、计算机模拟

在固井施工时，涉及到多个因素的计算，不能仅凭经验简单确定所有相关因素带来的各种变化。计算机模拟程序的使用给出了工程设计的多样性。许多参数包括流态、流变性、泵速、井眼轨迹及多余的水泥浆处置都可以被模拟，然后以图形或列表形式输出，也可以综合这两种输出形式以形成更为详细的报告。

计算机模拟程序可用来实时数据采集并进行后期分析。实时工作中，工程师在泵送时研究井眼工况，并进行必要的修改。后期的分析模式允许工程师重新推敲泵送过程，各种工况信息成为生产工艺流程设计的基础数据。

八、后期数据

由于 Wytch 现场从费用考虑，并不是每口开发井都进行声变测井。在 1M-10-SP 井中，声变测井 2 次，一是作为生产井进行测井；二是作为自喷井进行测井。每次测井时，套管内充填海水，并且测井时未使用压力。2 次测井结论为封固良好，同时该项目按计划进行，现场未出现尾管封固不好的现象，不必进行修井作业。

资料来源于美国《SPE 62893》

（收稿日期 2006-11-13）