

# 大牛地气田水平井固井技术与实践

李正国

华北石油局井下作业大队 HB1401 固井队

**摘要:** 本文分析了影响水平井固井质量的因素和难点, 并通过对鄂尔多斯盆地大牛地气田水平井固井设计、施工数据和固井质量的分析对比, 提出了解决水平井固井难题的技术、工艺措施, 在该工区 DP3 井进行了现场应用并取得了较好的效果。

**关键词:** 水平井固井 水泥浆性能 顶替效率

水平井钻井技术是高效开发低渗薄层油(气)藏的最佳技术手段。随着大牛地气田勘探开发力度的进一步加大, 近两年开始逐步开展低孔、低渗岩性气藏水平井开发的试验性研究, 以达到提高单井产能的目的。由于水平井(大斜度井)受井眼轨迹改变和重力作用等问题的影响, 增加了水平井固井的难度, 因此, 系统分析影响水平井固井质量的各种因素, 深入研究和探讨水平井固井技术, 对于提高水平井固井质量有着十分重要的意义。

## 1 影响水平井固井质量的因素和难点分析

1.1 由于井眼轨迹的变化和重力作用的影响, 套管在通过大斜度井段和水平井段时与井壁之间的摩阻增大, 导致套管下放困难。

1.2 水平井固井要求水泥浆的性能不仅要有很好的防气窜效果, 而且要具有低滤失、零析水、微膨胀和很好的流动性和沉降稳定性。

1.3 在钻井过程中为了井内安全, 要求钻井液密度适当过平衡, 具有较高的粘度和切力, 而固井要求钻井液具有较低的粘度和切力, 需要很好地解决钻井和固井对钻井液性能不同要求的矛盾。

1.4 相对直井而言, 水平井的井壁稳定性较差, 循环洗井时的排量控制都较低, 不利于彻底清除水平井段低边沉积的岩屑, 从而影响顶替效率。

1.5 水平井固井要提高顶替效率需要解决好以下问题:

① 由于井斜角的影响, 大斜度井段和水平井段套管所受的重力方向不再是轴向而是径向, 这一重力极易导致套管偏心, 使套管低边的钻井液驱动困难, 容易窜槽, 从而影响水泥浆的顶替效率。

② 水平井的钻井液性能偏重考虑了井壁稳定的因素, 泥浆比重、粘度一般比较高, 流动性差, 固井时严重影响顶替效率。

③ 水泥浆的流变性和沉降稳定性是相互制约的, 水平井固井的水泥浆体系要求浆体必须具有良好的稳定性, 而浆体的流动性又是提高顶替效率的必要条件, 需要借助合适的外加剂调节其性能来满足固井的需要。

④ 合理地设计前置液性能和用量是提高顶替效率、防止各种流体之间窜槽的关键。

## 2 大牛地气田水平井固井设计、施工数据对比分析

### 2.1 大牛地气田水平井的井身结构对比见表 1 (井径扩大率按 10%计算)

表 1 大牛地气田水平井井身结构对比表

| 序号<br>井身<br>开数<br>结构 | 井身结构 1  |            | 井身结构 2   |            |
|----------------------|---|------------|--|------------|
|                      | 井眼尺寸*套管尺寸   | 井眼环容 (l/m) | 井眼尺寸*套管尺寸  | 井眼环容 (l/m) |
| 一开井段                 | 12 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> " *9 <sup>5</sup> / <sub>8</sub> " | ——         | 17 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> " *13 <sup>3</sup> / <sub>8</sub> " | ——         |
| 二开井段                 | 8 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> " *7"                               | 19.5       | 12 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> " *9 <sup>5</sup> / <sub>8</sub> "  | 45.0       |

### 2.2 大牛地气田水平井固井水泥浆体系性能对比见表 2

表 2 水平井固井水泥浆性能对比

| 井号<br>水泥浆<br>开数<br>类型   | DP35-1                 |        | DF1    |        | DF2    |        |       |
|-------------------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
|                         | 低密度                    | 常规浆    | 低密度    | 常规浆    | 低密度    | 常规     |       |
| 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.25                   | 1.89   | 1.25   | 1.89   | 1.23   | 1.90   |       |
| 稠化时间 (70℃×30)           | 452                    | 124    | 235    | 139    | 490    | 2      |       |
| 稠化过渡时间 min              | 170                    | 19     | 39     | 20     | 15     | 1      |       |
| 可泵时间 min                | 282                    | 105    | 196    | 119    | 475    | 2      |       |
| 失水 (6.9MPa×30℃)ml       | 38                     | 7.2    | 20     | 4.6    | 40     | 1      |       |
| 抗压强度 (70℃×24h) MPa      | 3.5                    | 23.8   | 3.8    | 23.5   | 3.7    | 2      |       |
| 自由水 ml                  | 0.2                    | 0.1    | 0.1    | 0      | 0.1    | 0      |       |
| 流动度 mm                  | 241                    | 228    | 254    | 225    | 246    | 2      |       |
| 相容性                     | 与前置液、钻井液相容性好           |        |        |        |        |        |       |
| 沉降稳定性                   | 没有分层，静置后上下密度差<0.03     |        |        |        |        |        |       |
| 流性指数                    | n                      | 0.8137 | 0.8498 | 0.9299 | 0.7332 | 0.7232 | 0.281 |
|                         | K (Pa·s <sup>n</sup> ) | 0.1100 | 0.1793 | 0.0837 | 0.3564 | 0.6834 | 0.457 |

## 2.3 DP35-1 井、DF1 井和 DF2 井固井数据分析对比见表 3

表 3 DP35-1 井、DF1 井和 DF2 井对比表

| 对比项目            | 井号                       | DP35-1 | DF1    | DF2   |
|-----------------|--------------------------|--------|--------|-------|
| 钻井液性能           | 钻井液粘度（范氏）s               | 30     | 270 以上 | 76    |
|                 | 钻井液比重                    | 1.09   | 1.28   | 1.19  |
|                 | 钻井液失水 ml                 | 5      | 3.4    | 3.6   |
|                 | 钻井液滤饼 mm                 | 0.3    | 0.3    | 0.3   |
|                 | 初切/终切                    | 2/4    | 18/27  | 6/13  |
| 前置液设计           | 前置液类型                    | 清水     | 120s   | 50s   |
|                 | 前置液占环空高度 m               | 200    | 100    | 150   |
| 紊流排量            | 设计紊流排量 l/s               | 33     | 50     | 76    |
|                 | 实际紊流排量 l/s               | 33-35  | 22     | 45    |
|                 | 环空上返速度 m/s               | 1.5    | 0.93   | 1.0   |
| 扶正器             | 是否加扶正器                   | 否      | 否      | 是     |
| 液柱压力和<br>平衡固井设计 | 流动摩阻 MPa                 | 9.0    | 10.3   | 4     |
|                 | 静压差 MPa                  | 8.7    | 0      | 3.5   |
|                 | 静液柱压力 g/cm <sup>3</sup>  | 1.35   | 1.27   | 1.354 |
|                 | 压稳当量密度 g/cm <sup>3</sup> | 1.21   | 1.215  | 1.236 |
| 固井质量评价          | 固井质量（尾浆段）                | 很好     | 一般     | 一般    |
|                 | 固井质量（低密度段）               | 很好     | 很差     | 很差    |

从表 1~3 的对比数据可以得出以下结论：

① 大牛地气田所施工的水平井井身结构相似，只是井眼大小、套管尺寸不同导致井壁与套管之间的环状间隙大小不同，而 DP35-1 井和 DF1 井的固井质量不同说明井身结构不是影响固井质量的主要因素。

② 以上 3 口井所选用的水泥浆（常规浆）体系滤失量、析水、沉降稳定性和流动性基本相同，完全能够满足水平井固井的要求，说明该水泥浆体系适应大牛地气田的水平井固井。

③ 对比钻井液性能发现 DP35-1 井的泥浆粘度和静切力明显优于 DF1 井和 DF2 井，说明钻井液性能是影响固井质量的一个重要因素。

④ 在前置液的性能和用量方面，DF1 井和 DF2 井所配制的前置液粘度高，流动性变差，设计量少，不利于提高紊流顶替效率。

⑤ 除了 DP35-1 井替浆排量达到紊流要求外，DF1 井和 DF2 井的替浆排量较低，按照表 1 提供的环容计算，水泥浆在环空的实际上返速度只有 1.0m/s 左右，难以实现紊流顶替。

⑥ 虽然 DP35-1 井和 DF1 井没有加放扶正器，但是 DP35-1 井的固井质量仍然很好，说明我们采用的替浆液（1.09g/cm<sup>3</sup>）和水泥浆（1.9g/cm<sup>3</sup>）形成了密度差，使管柱在大斜度井段和水平井段处于悬浮状态，保证了套管的居中度，达到了“漂浮”固井的目的。

⑦ 从平衡压力固井技术的应用看，3口井的静液柱压力当量密度基本保持在  $1.35 \text{ g/cm}^3$ （地层破裂压力  $1.6 \text{ g/cm}^3$ ）以内，不可能压漏地层；尾浆在失重的情况下井底静液柱压力当量密度保持在  $1.20 \text{ g/cm}^3$ （地层压力  $1.15 \text{ g/cm}^3$ ）以上，能够压稳气层。

⑧ 从尾浆段和低密度段的封固质量来看：DF1井和DF2井的声幅表现出越靠近井底位置的固井质量越好，这点可以说明，低密度水泥浆流动性比较好，对井壁上的虚泥皮有一定的清除效果。

### 3 大牛地气田水平井固井工艺技术措施

#### 3.1 井眼准备

钻井队在完钻通井时要充分循环泥浆，循环排量不低于钻进时的最大排量，循环时间不低于2周，彻底将井底和水平井段沉积的岩屑循环干净；对不规则的井段采取短起下钻划眼，保证井眼畅通；在大斜度井段和水平段注入3%左右的塑料球，降低摩阻，为套管的顺利入井创造条件。

下完套管后必须通过大排量循环泥浆的方式清除井壁和套管壁上形成的虚泥皮，循环排量不低于钻进时的1.2—1.5倍，循环时间不低于2周；在压稳不漏的情况下调整钻井液的性能，使固井前的泥浆性能达到“三低一薄”，即低粘、低切、低失水和薄泥饼，以达到提高顶替效率的目的。

#### 3.2 套管扶正器的选择和安放

由于大斜度井段和水平井段管柱的重力方向发生改变使弹性扶正器在管柱径向压力的作用下易发生变形，扶正效果变差，但是，刚性扶正器在随套管入井时的摩阻很大，不利于套管顺利入井，因此，采用弹性和刚性扶正器交互使用的方法既可以尽量降低摩阻，又可以提高对套管的扶正作用。弹性扶正器的类型以双弓最好，这种扶正器的扶正效果比较好，而刚性扶正器尽量选用旋流式扶正器，可以提高顶替效率。

在大斜度井段和水平段扶正器的安放数量尽量使套管居中度达到67%以上，即：每3根套管安放2个扶正器。在压力允许的情况下尽量降低替浆液的密度，使套管在浮力作用下处于漂浮状态，有利于套管居中。

#### 3.3 水泥浆性能的优化

大牛地气田的水泥浆体系具有很好的防气窜效果，作为水平井固井的水泥浆体系，该浆体的失水低、析水为零、静置不分层、膨胀效果和流动性好。水泥浆体系的控制指标见表4。

#### 3.4 替浆排量的确定

按照大牛地气田水平井的井眼条件和目前的水泥浆体系，替浆排量必须保证低密度水泥浆的上返速度在  $1.3 \sim 1.5 \text{ m/s}$  时才能达到紊流，按照井身结构1中的环空容积计算的替浆排量为  $31 \sim 351 \text{ l/s}$ ，按照井身结构2中的环空容积计算的替浆排量为  $60 \sim 701 \text{ l/s}$ 。

#### 3.5 前置液的设计

前置液、泥浆和水泥浆三者之间必须有良好的相容性，前置液的比重应该低于低密度水泥浆的比重，对于钻井液比重低于  $1.3 \text{ g/cm}^3$  的井，一般在清水中加入适量的表面活性剂作为冲洗液更有利于达到紊流，设计用量按照其与井壁的接触时间不低于  $7 \sim 10 \text{ min}$  计算。

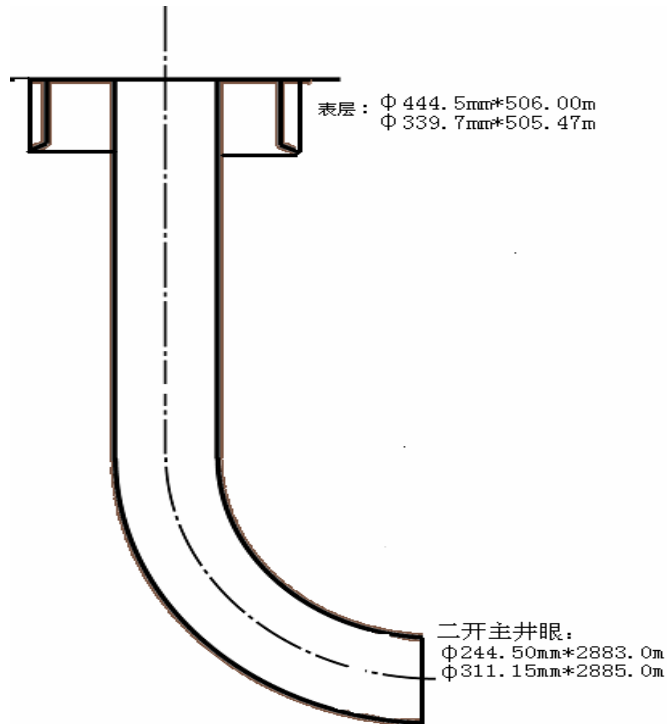
表 4 大牛地气田水平井固井水泥浆体系性能要求

| 水泥浆性能     |     | 控制范围             | 控制的目                             |
|-----------|-----|------------------|----------------------------------|
| 水泥浆<br>比重 | 低密度 | 大于泥浆比重，小于常规浆比重   | 利于顶替泥浆，实现平衡压力固井                  |
|           | 常规浆 | 1.9              | 水泥石的强度高，渗透率低                     |
| 稠化（可泵）时间  |     | 按照施工所需的时间确定      | 确保安全施工                           |
| 稠化方式      |     | 直角稠化             | 防止候凝期间发生气侵、气窜                    |
| 失水        |     | 小于 50ml          | 保护气层；施工安全；降低水泥石体积收缩率；改善浆体的析水和稳定性 |
| 析水        |     | 小于 0.1%，尽量达到 0   | 防止水平井段上侧形成自由水通道                  |
| 流动度       |     | 大于 220mm         | 有利于提高顶替效率；便于配浆                   |
| 流动性（n 值）  |     | 0.7~0.85         | 容易达到紊流                           |
| 膨胀效果      |     | 大于 0.2%          | 提高水泥石的致密性                        |
| 浆体稳定性     |     | 静置后上下密度差不超过 0.03 | 防止分层影响水泥石致密性                     |

#### 4 现场应用（以 DP3 井为例）

##### 4.1 井身结构（见图 1）

图 1 DP3 井 A 点前井身结构示意图



##### 4.2 固井方法：采用一次注水泥全井封固的固井工艺。

### 4.3 固井前钻井液性能

表 5 固井前泥浆性能要求

| 密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 粘度<br>(S) | 滤失量<br>(ml) | 泥饼<br>(mm) | 切力 (Pa) |    | 含砂量<br>% | PH 值 |
|----------------------------|-----------|-------------|------------|---------|----|----------|------|
|                            |           |             |            | 初切      | 终切 |          |      |
| 1.19                       | 76 (马氏)   | 3.6         | 0.3        | 6       | 13 | 0.2      | 9    |

### 4.4 压力计算

- ① 环空静液柱压力：35.03MPa（当量密度为：1.341g/cm<sup>3</sup>）。
- ② 尾浆失重时的井底静液柱压力：31.83MPa（当量密度为：1.218g/cm<sup>3</sup>）。

### 4.5 套管串结构设计

管串结构：浮鞋+1 套管+浮箍+1 套管+浮箍+套管串+套管阀+套管串+水泥头

扶正器加法：该井只有在井底部位安放了 6 只弹性扶正器

### 4.6 水泥浆体系设计及性能

表 6 水泥浆灰样性能检测结果

| 性 能                    | 低密度                   | 常规水泥浆  |        |
|------------------------|-----------------------|--------|--------|
| 密度(g/cm <sup>3</sup> ) | 1.25                  | 1.90   |        |
| 稠化时间(70℃×30 MPa)min    | 329                   | 213    |        |
| 稠化过渡时间 min             | 15                    | 16     |        |
| 可泵时间 min               | 314                   | 197    |        |
| 失水(6.9MPa×30℃)ml       | 9.8                   | 10     |        |
| 抗压强度(70℃×24h) MPa      | 6.5                   | 24.2   |        |
| 自由水 ml                 | 0.1                   | 0      |        |
| 流动度 mm                 | 249                   | 237    |        |
| 相容性                    | 与前置液、钻井液相容性好          |        |        |
| 悬浮性                    | 没有分层，静置后上下密度差<0.03    |        |        |
| 流性指数                   | n                     | 0.8784 | 0.7359 |
|                        | K(Pa·s <sup>n</sup> ) | 0.1175 | 0.3304 |

### 4.7 顶替排量计算

低密度紊流临界排量：V<sub>c</sub>=1.50 m/s      Q<sub>c</sub>=70.2 l/s

尾浆塞流临界排量：V<sub>c</sub>=0.12 m/s      Q<sub>c</sub>=5.28 l/s

### 4.8 前置液的设计

用水泥浆添加剂（锁水剂、分散剂）和泥浆材料（低粘CMC）配制低失水、低粘度和流动性较好的前置液 17.0m<sup>3</sup>（占环空高度 350m左右）。

### 4.9 施工技术措施

井眼准备：通井和下完套管后要求井队大排量循环洗井，要求排量不小于钻井排量的 1.2 倍，确保井眼干净、通畅，在井壁稳定的前提下调整泥浆粘度，提高泥浆的流动性。

### 4.10 取得的成果

DP3 井的固井质量在验收中评价为优质井，从 DP3 井的声幅曲线看，我们通过对 DP35-1 井、DF1 井、DF2 井的分析所形成的大牛地气田水平井固井的技术措施对 DP3 井乃至今后的水平井固井具有很好的指导意义。

表 7 DP3 井固井声幅结果表

| 井段        | 声幅值 | 井段        | 声幅值% | 井段       | 声幅值% | 井段    | 声幅值% |
|-----------|-----|-----------|------|----------|------|-------|------|
| 2883-1886 | <15 | 1886-1538 | <40  | 1538-858 | >40  | 858-0 | <40  |

## 5 结论与认识

① 水平井固井的水泥浆体系必须降低失水，减少和消除自由水，提高浆体的流动性和沉降稳定性。

② 重视钻井液性能和井眼条件对顶替效率的影响，最大程度的保持井眼干净，降低钻井液的粘度和切力，改善钻井液的流动性，提高顶替效率。

③ 设计对井壁具有良好清洗效果的前置液，最大限度清除井壁上的泥饼，提高顶替效率。

④ 正确运用流变学设计原理，在压稳防漏的前提下尽量达到紊流顶替，提高顶替效率。

⑤ 建议采用套管“漂浮”技术实现套管居中，即：增大替浆液和水泥浆的密度差，使套管在浮力作用下处于悬浮状态；另外，下套管前可以在大斜度井段和水平井段注入加重泥浆，使套管到达该井段后产生浮力，降低对扶正器的径向压力，减小下套管的摩阻。

### 参考文献：

- [1] 张国仿. 2002. 提高水平井固井质量工艺技术. 江汉石油职工大学学报
- [2] 马海忠等. 1996. . 水平井固井水泥浆技术. 钻采工艺研究
- [3] 李美娜. 2007. 最新石油固井关键技术应用手册. 石油工业出版社
- [4] 侯磊. 1996. 水平井注水泥时的钻屑清除问题. 国外钻井技术

### 作者简介：

李正国，1972 年生，工程师，1997 年毕业于中国地质大学，现在华北石油局井下作业大队 1401 固井队工作，任技术副队长。电话：13325415790。E-mail：hbjxlzg@126.com