

◆固井与泥浆◆

# 提高复杂井固井质量的钻固一体化技术应用研究

江山红<sup>1</sup> 万绪新<sup>2</sup> 王树永<sup>3</sup> 张 浩<sup>4</sup> 王治法<sup>1</sup>

(1. 中国石油化工勘探开发研究院德州石油钻井研究所, 山东德州 253005; 2. 胜利石油管理局勘探监理部, 山东东营 257000; 3. 胜利石油管理局黄河钻井总公司, 山东东营 257013; 4. 滇黔桂石油勘探局第一勘探公司, 山东临邑 251500)

**摘要:** 钻井时钻井液在井壁上形成的泥饼不管有多薄, 固井时都会在井壁上形成一个不可固化层, 尤其是漏失层段, 易导致第二界面的胶结强度达不到预期的效果。钻固一体化工作液技术通过引入复合活性材料, 形成可固化泥饼层, 固井施工时可以使钻井液的性能转换、潜活性激活, 从而提高易漏地层的承压能力, 促使井壁附着的泥饼固结, 提高地层-泥饼-水泥环的胶结亲和力, 有效地解决了传统固井水泥浆与钻井液不相容的问题。该技术在两口井进行了现场试验并获得成功, 油层井段固井质量达到了优质标准, 有效地提高了第二界面胶结质量, 减少和阻止了各种流体的层间窜通。

**关键词:** 钻固一体化; 钻井液; 水泥浆; 水泥添加剂; 胶结强度

**中图分类号:** TE254.3; TE256.6   **文献标识码:** B   **文章编号:** 1001-0890 (2006) 05-0030-04

钻固一体化技术是根据钻井作业中钻井液、前置液以及固井液等紧密联系的施工环节和影响特点, 而开发的一种兼顾钻井、固井两大功能的油田工作液技术。一体化工作液中本身含有某些潜在活性物质, 在钻井时活化胶凝粉呈惰性状态, 满足长期循环的要求, 形成具有固化活性的潜在的特殊泥饼层。钻井完成后, 在工作液中适当补充活性物质和激活剂, 作为固井用的胶凝浆, 调节凝结时间, 使凝胶固化, 完成一次注水泥施工作业<sup>[1]</sup>。

该技术利用工作液中活化胶凝粉的物理化学特性来改善泥饼与水泥环、地层的胶结亲和力, 由于钻井液、泥饼、固井液含有相同的潜在活性材料, 固井时可以实现同步固化胶结, 有效地解决了传统固井水泥浆与钻井液不相容的问题, 避免了常规水泥浆固井时出现在水泥石、泥饼和地层过渡层类似于“三明治”的结构, 防止了地层过渡层间高低压油气水层的相互窜通。该技术是提高第二界面胶结质量的重要技术措施之一, 同时由于井壁上泥饼的存在, 显著降低了固井液滤液对油气层的污染。钻固一体化技术实现了钻井液、固井液的有机结合, 是未来钻井工程技术发展的一种趋势。

## 1 钻固一体化工作液的组成及机理

### 1.1 界面胶结的影响因素分析

井壁的泥岩、砂岩中均含有铝硅酸盐和碳酸盐矿

物, 水泥浆在硬化时通过水化物多种键桥连接成网状结构, 对井眼环空围岩形成有效的胶结<sup>[2-3]</sup>。使用普通钻井液钻井会在井壁上形成泥饼, 不管其有多薄, 固井时都会在井壁上形成一个不可固化层, 破坏了水泥对地层的亲和力及固化胶结性能, 使水泥环与地层岩石之间存在不同程度的剥离, 产生微裂缝, 导致界面胶结强度下降, 留下层间窜通的隐患。尤其是漏失井段, 大量堵漏材料与钻井液形成的厚而疏松的泥饼, 导致第二界面胶结质量较差。室内研究表明, 当钻井液与水泥浆相混时, 除钻井液增稠外, 钻井液中的某些组分(如降滤失剂、防塌剂、降粘剂等)严重影响水泥浆的性能和固化效果。这样原本在入井前确定的凝结时间, 在固井后, 因钻井液的影响可能导致水泥浆长时间不凝。大量的现场应用实例表明, 仅依靠固井工艺技术还不能完全解决固井质量问题, 比如不规则井眼对水泥浆顶替效率的影响、井壁及套管表面附着的粘稠钻井液对水泥浆性能的影响、窄小环空顶替效率及厚泥饼对第二界面胶结强度的影响等都是严重影响固井质量的重要因素。因此提高固井质量,

收稿日期: 2006-05-11; 改回日期: 2006-06-14

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科研攻关项目“钻井液固井液一体工作液技术研究”(编号: P04074)部分研究成果

作者简介: 江山红(1968—), 男, 1992年毕业于中国地质大学(武汉)分析化学专业, 工程师。

联系电话: (0534) 2670175

不仅是固井工艺技术的问题, 还应考虑其它作业流体和环节。

## 1.2 钻固一体化工作液的组成

借鉴高性能混凝土的研究成果, 研制了一种添加有复合活性材料的适用于钻井和固井的工作液, 赋予钻井液以可固化的潜活性能力。该工作液主要由潜活化胶凝粉材料、界面增强剂、活性激发剂和活性调节剂等组成。活性胶凝材料是优选活性质量系数高的颗粒结晶体, 通过机械粉碎方法降低粉末颗粒尺寸、改变晶体结构而制备的具有高活性的亚稳态固体粉末材料或多相复合材料, 该材料与钻井液亲和性好, 能通过吸附作用结合到粘土晶层端部, 堵塞粘土层片之间的缝隙, 有效抑制粘土的水化, 能提高泥饼与水泥环、地层的胶结亲和力。

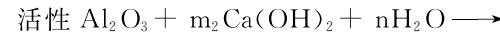
工作液形成的泥饼除具有正常的性能外, 还具有高效封堵微裂缝的能力, 其中的活性物质还可被碱金属氧化物等网状结构介质的水化反应所激活而发生水化固化反应, 界面增强剂可改善页岩界面张力, 增强水泥环与地层岩石间的胶结能力, 提高第二界面的胶结质量。

## 1.3 钻固一体化工作液的作用机理

国内许多学者对水泥固化体界面过渡层进行了深入的研究<sup>[4]</sup>, 认为固井水泥界面存在过渡层, 除了泥饼因素外, 主要是由于水泥浆与井壁表面自由水形成水膜层而形成的, 离子半径小的  $\text{Ca}^{2+}$  容易扩散, 移动到界面水膜层, 在过渡层析出的水化物主要是  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 并呈结晶的定向排列。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  与 C—S—H 凝胶相比, 结晶粗大, 比表面积小, 强度也低, 如果表面形成的水膜层过厚, 很容易形成空隙。

一体化工作液中的潜活化胶凝粉材料含有大量活性微细矿物, 可以有效改善过渡层性质。胶凝材料通过活性激发剂和活性调节剂激活作用, 活化胶凝材料玻璃体表面的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  与  $\text{OH}^-$  反应生成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、

$\text{Mg}(\text{OH})_2$ , 使玻璃体表面破坏, 活化胶凝粉玻璃体网络结构中含钙多的连续相中  $\text{Ca}-\text{O}$ 、 $\text{Mg}-\text{O}$  键被  $\text{OH}^-$  破坏后,  $\text{OH}^-$  进一步进入玻璃体内就有了必要的通道, 而激活剂中的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  等与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  进行替换, 连接在  $\text{Si}-\text{O}$  键上, 这样就实现了对玻璃体网络结构的破坏, 形成大量的活性  $\text{SiO}_2$ , 其中的活性  $\text{SiO}_2$  和活性  $\text{Al}_2\text{O}_3$  能通过活性反应吸收水化反应过程中产生的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体, 转化成耐冲蚀的  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  的水化产物, 其水化反应式为:



虽然过渡层  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体不断形成又迅速被溶解, 但不断地形成 C—S—H 凝胶沉积, 并与已形成的水化硅酸钙产生二次水化反应, 使浆体逐渐变稠、硬化, 由粘塑性向弹塑性最后向脆性发展, 强度迅速增加, 在新生的水化胶结界面, 消除了削弱界面胶结强度的隐患, 从而提高了界面的胶结强度。

钻固一体化工作液泥饼的固化反应直接受到一体化工作液反应机理和过程的控制, 只要能控制潜活化胶凝粉的水化反应过程, 就可以依照其活性变化规律有效地控制一体化工作液泥饼的活性。

## 2 钻固一体化工作液的性能评价

### 2.1 钻井液

室内选用正电胶聚合物钻井液作为工作液的基本液, 优选出工作液材料, 基本配方为: 现场井浆+流型调节剂+潜活化胶凝粉+降滤失剂, 活性激发剂和活性调节剂在固井时使用。通过对工作液流变性、滤失性、润滑性等进行试验, 确定各种材料的最优加量, 工作液性能见表 1。从表 1 可知, 工作液性能完全满足现场钻井施工的要求。

表 1 一体化工作液的室内综合性能

配方	密度/ $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$	漏斗粘度/s	塑性粘度/ $\text{mPa} \cdot \text{s}$	动切力/Pa	静切力/Pa	滤失量/mL	HTHP 滤失量/mL	泥饼厚度/mm	pH 值
1	1.14	46	17	6.5	1.5/7.0	5.4	13.4	0.5	10.0
2	1.18	53	18	8.0	1.5/7.0	5.2	13.6	0.6	10.5
3	1.23	55	16	5.5	2.0/5.0	5.1	11.6	0.7	10.5
4	1.28	56	20	8.0	2.0/7.0	5.5	11.8	0.7	10.5

## 2.2 工作液(老化)的安全性评价试验

在加入活化胶凝粉以后, 钻井液性能是否会受到影响? 是否会提前活化固结或失去活性? 这关系到钻井和固井作业的安全, 为此, 笔者在室内进行了静止

存放和模拟井下温度时的滚动老化试验。结果表明, 30 d 后工作液流动性好, 各项性能指标合适, 潜活性胶凝材料处于惰性状态, 对钻井液性能无大的影响(具体数据见表 2)。

表 2 含活化胶凝粉的工作液存放不同时间后的性能变化

活性材料含量, %	试验条件	密度/kg·L <sup>-1</sup>	塑性粘度/mPa·s	动切力/Pa	API 滤失量/mL	pH 值
0	135 ℃滚动 48 h	1.06	17	7.0	6.2	9.0
10	135 ℃滚动 48 h、3.5 MPa	1.15	18	7.0	5.3	10.0
	室内模拟现场升温、放置 30 d		20	8.0	5.3	10.0
20	135 ℃滚动 48 h、3.5 MPa	1.28	19	7.5	5.0	10.0
	室内模拟现场升温、放置 30 d		24	8.0	5.2	10.5
30	135 ℃滚动 48 h、3.5 MPa	1.36	24	7.0	5.2	11.0
	室内模拟现场升温、放置 30 d		235	9.0	5.4	11.0
40	135 ℃滚动 48 h、3.5 MPa	1.45	23	9.0	5.3	11.0
	室内模拟现场升温、放置 30 d		25	6.0	5.6	11.0

## 2.3 固井液

室内对钻井液的性能转换和潜活性激活等进行了试验，在钻井液中补充活化胶凝粉和活化剂，调节凝结时间，作为固井用的胶凝浆，转化成的固井液主要性能见表 3。从表 3 可以看出，转化后的固井液流动性较高，在低水灰比下仍能保持良好的流动性，密度 1.53 kg/L 以上的固井液通过激活后的抗压强度大于 14 MPa，满足固井技术规范。

表 3 聚合物钻井液转化的固井液性能

配方	密度/kg·L <sup>-1</sup>	温度/℃	流变性能	API 滤失/mL	24 h 抗压强度/MPa
1	1.45	85	42/27/20/13/5/4	62	13.8
2	1.53	85	58/35/26/17/8/7	57	14.6
3	1.65	85	85/50/39/22/10/6	45	16.7
4	1.72	85	119/70/53/35/13/12	39	17.2

## 3 第二界面胶结强度的试验与分析

### 3.1 一体化固井液固化体的界面胶结试验

普通钻井液泥饼不能有效地与油井水泥浆固化体胶结在一起，这是常规水泥浆固井时第二界面胶结质量比较差的主要原因之一。一体化工作液中的某些组分（如降滤失剂、防塌剂、活性材料等）在固井前后没有发生大的变化，克服了常规钻井液与水泥浆组分差异大的缺点。室内采用高温高压泥饼固化及胶结质量/裂缝封堵评价装置对不同固井液与仿真渗透性井壁整体固化进行胶结试验。不同泥饼在渗透性砂心筒上通过高温高压制成，包括普通聚合物泥饼、一体化工作液泥饼，固井液为一体化工作液转换而成、水灰比为 0.44 的 G 级水泥配成的常规水泥浆两种，试验条件为在 21 MPa、95 ℃下养护 24 h，利用计算机采集高温高压状态下第二界面胶结强度数据（见表 4）。由表 4 可以看出，普通钻井液泥饼存在时界面胶结效

果差，油井水泥浆的水化反应对一体化工作液泥饼影响作用较弱。一体化工作液的泥饼与固化体的第二界面胶结质量好，胶结强度有较大提高。由一体化工作液转换而成的固井液能够激发一体化工作液泥饼中的活性物质，使泥饼与固井液发生同步的水化反应。

表 4 第二界面剪切胶结强度试验结果

井壁附着物	固井液	胶结强度/MPa	胶结情况描述
普通钻井液泥饼	水泥浆	0.195	泥饼软，水泥与泥饼之间有软泥
砂岩	MTC 浆	0.452	泥饼有固结，强度低
	水泥浆	3.120	胶结质量好
工作液	工作液浆	2.710	胶结质量好
	水泥浆	1.210	泥饼有固结，强度适中
泥饼	工作液浆	2.680	剪切面粗，表面有粘结附着物

### 3.2 泥饼的预处理与固化活性试验

一体化工作液的泥饼内部含有胶凝成分，激活剂通过扩散渗透作用进入泥饼使泥饼固化，而且由于滤失，泥饼内部的活化胶凝粉浓度偏高，固化时强度有升高的趋势，此时的泥饼不仅不存在不相容的问题，而且成为固化体不可分割的一部分。对泥饼预处理和激活泥饼固化活性的对比试验结果表明，普通钻井液泥饼与固化体的界面清晰，无法胶结；一体化工作液泥饼与固化体固化结合在一起，不存在明显过渡层界面。

### 3.3 工作液固化体的界面胶结微观分析

不同钻井液体系形成的泥饼与固井液在高温高压下结合固化后，对胶结界面进行了多方位的能谱分析和胶结生成产物微观分析，通过对工作液固化体的界面胶结亲合力扫描微观分析，一体化工作液及泥饼在激活剂的渗透扩散后，与固化体整体胶结良好，胶结产物趋势相似，能谱线扫描分析表明已分不出胶结界面。而普通钻井液泥饼与固化体根本无法胶结在一

起，线扫描图谱中可明显看出过渡层和微裂缝。

## 4 现场试验

### 4.1 丰8井

丰8井是一口老井复查井，完钻井深4 250 m。该井井眼尺寸小（上部为 $\phi 139.7$  mm油层套管），环空间隙小（ $\phi 95$  mm尾管与上层套管间隙为11.8 mm），井底温度高（154 °C），同时该井渗透性地层井壁上附着大量粘稠钻井液、泥饼。如果采用常规水泥浆固井，井下安全和固井质量都难以保证。因此，该井在钻至井深4 170 m前，以室内试验结果为依据，将现场聚合物钻井液转换为一体化工作液。完成钻进、扩眼、电测、下尾管等工作后，先加入激活剂将泥饼预固化，然后再用胶凝浆固井，变密度测井表明小间隙井段第二界面胶结质量达到良好，特别是尾管与上层套管间隙部分固井质量达到优良。

### 4.2 营47-24井

营47-24井是一口热采生产井，完钻井深1 600 m，由于热采生产井对固井质量的特殊要求，采用预应力固井方式，在固井液中混入30%的石英砂作为热稳定剂；另外，由于油气层多，对第二界面封固质量要求很高。因此，在1 100~1 600 m油层段采用一体化工作液技术，以提高封堵强度，增强其界面胶结力。该井钻至井深1 100 m时改小循环并将钻井液转化为钻固一体化工作液钻进，转化后的一体化工作液具有良好的流变性，无固化、絮凝等现象。一体化工作液钻进井段井径规则，平均井径扩大率为

6.6%，平均机械钻速20.8 m/h；固井采用钻固一体化工作液激活技术固井，固井液返至地面。固井候凝36 h后声幅和变密度测井表明，固井合格率100%，油层井段固井质量达到了优质标准，其中第二界面胶结质量优质率达93%。

## 5 结论与建议

1) 钻固一体化工作液在作业时同时具有普通钻井液、前置液以及固井液的功能，通过加入潜在活性材料，钻井时作为钻井液，具有常规钻井液的功能，完钻后，通过活性控制技术使其转换为固井液进行固井施工。

2) 现场试验表明，钻固一体化工作液转换成一体化固井液后，实现了工作液泥饼与固化体的整体固化胶结，大大提高了固井第二界面的胶结质量。

3) 钻固一体化技术作为石油钻井工程中的技术创新，刚刚起步，应结合新工艺新方法开展这方面的技术攻关。

## 参 考 文 献

- [1] 吴达华, 黄柏宗. 新型“钻井”固井液工艺和技术 [J]. 钻井液与完井液, 2002, 19 (3): 1-6.
- [2] 杜江. 提高水泥环第二界面胶结质量的固井技术 [J]. 石油钻探技术, 1999, 27 (1): 35-36.
- [3] 苏远大, 孙建孟, 施展飞, 等. 地层声速对固井质量评价的影响及消除方法 [J]. 石油钻探技术, 2005, 33 (4): 39-41.
- [4] 冯乃谦. 高性能混凝土结构 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

## Integrated Drilling and Cementing Fluid Technique to Improve Cementing Quality in Complex Wells

Jiang Shanhong<sup>1</sup> Wan Xuxin<sup>2</sup> Wang Shuyong<sup>3</sup> Zhang Hao<sup>4</sup> Wang Zhifa<sup>1</sup>

(1. Dezhou Petroleum Drilling Research Institute, Petroleum Exploration & Development Academy of Sinopec, Dezhou, Shandong, 253005, China; 2. Department of Exploration & Supervision, Shengli Petroleum Administration, Dongying, Shandong, 257000, China; 3. Huanghe Drilling Corporation, Shengli Petroleum Administration, Dongying, Shandong, 257013, China; 4. The First Drilling & Exploration Company, Dianqiangui Petroleum Exploration Bureau, Linyi, Shandong, 251500, China)

**Abstract:** The mud cake formed during drilling can not be solidified during cementing operation regardless of its thinness, which may result in poor II interface bonding, especially in thief zones. Through the introduction of active compound materials, Integrated drilling and cementing technique can make solidifiable mud cake form on well wall. During cementing operation, by means of addition of active agents, mud cake can be solidified along with cement slurry, which can effectively solve the incompatible problem between conventional cement slurry and mud and therefore improve the bonding between formation, mud cake and cement sheath. The applications in lost circulation interval and steam drive well show that the technique can effectively improve II interface bonding and reduce oil, gas and water migration. As an innovation in drilling engineering, the integrated drilling and cementing technique has displayed its great prospect.

**Key words:** integrated drilling and cementing fluid technique; drilling fluid; cementing slurry; cement additive; bond strength