

◀教授专家专栏▶

# 无侵害钻井液技术研究现状及展望

张克勤<sup>1</sup> 刘庆来<sup>2</sup> 杨子超<sup>2</sup> 唐 虹<sup>3</sup> 贺建军<sup>3</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083;2. 中国石化西北分公司,新疆乌鲁木齐 830011;3. 中国石油塔里木油田分公司,新疆库尔勒 841000)

**摘要:** 美国 EDTI 公司研制的 DWC2000 无侵害钻井液 (non-invasive drilling fluid) 主要由动滤失降低剂 (FLC-2000)、堵漏剂 (LCP-2000) 和润滑剂 (KFA-2000) 三种处理剂配制而成, 其机理是通过物理化学和表面化学的作用, 逐步封堵并形成封堵膜, 使动滤失量降低, 适用于淡水、盐水、饱和盐水和油基钻井液, 加量仅为 1%~2%, 抗温可达 204 °C, 可有效降低动滤失, 提高渗透率恢复率。介绍了无侵害钻井液砂床滤失仪的结构及滤失量测量方法, 对国外 20 种钻井液的 API 滤失量和砂床滤失量的对比结果进行了分析。详细介绍了我国在无渗透钻井液技术研究方面的主要进展, 并对该技术进行了分析与展望。

**关键词:** 无侵害钻井液; 滤失量; 砂床滤失量; 钻井液添加剂; 防止地层损害

**中图分类号:** TE254<sup>+</sup>. 3    **文献标识码:** B    **文章编号:** 1001-0890 (2006) 01-0001-05

## 1 无侵害钻井液概述<sup>[1-6]</sup>

1990 年, 美国 EDTI 公司 (Environmental Drilling Technology Inc.) 研制成功了 FLC2000 (动滤失降低剂)、LCP2000 (剪切稠化堵漏剂) 和 KFA2000 (润滑剂) 三种钻井液处理剂, 并配制出一种新的钻井液体系, 称之为 DWC2000 无侵害 (或无侵入) 钻井液 (non-invasive drilling fluid), 其油气层保护效果非常好。这三种钻井液处理剂适用于淡水、盐水和饱和盐水, 抗温 204 °C, 加量仅为 1%~2%, 不再需要添加水解聚丙烯酰胺、沥青质、乙二醇等处理剂, 并可预装成一袋化 (one sack product) 使用, 不受地层中石膏、盐、硫化物等污染。

DWC2000 无侵害钻井液所用的 3 种处理剂的基本组成和机理为:

1) FLC2000 动滤失降低剂。FLC2000 是一种用植物衍生物质形成的混合物, 含有部分水溶、全水溶和不溶有机聚合物以及一些金属氧化物, 其作用机理主要是通过物理化学和表面化学的作用逐步封堵并形成封堵膜, 使钻井液动滤失量降低。FLC2000 可用于水基和油基钻井液中, 加量可根据需要适当调整。

2) LCP2000 剪切稠化 (shear-thickening) 堵漏剂。LCP2000 由不同比例的薄片、纤维和颗粒搭配组成, 包括 5~100 目的薄片、0.2~1.3 mm 的纤维和细度 500 目的颗粒材料。它通过剪切稠化起到堵漏作用, 其作用机理不是传统的架桥作用, 而是处理剂膨胀变大限制渗透, 薄片吸入液体后膨胀而从颗粒挤

出滤液, 形成堵漏层。

3) KFA2000 防塌润滑剂。KFA2000 主要由钾基有机微乳状液组成, 是一种钻井液调节剂, 可消泡、润滑、降粘。

## 2 无侵害钻井液体系性能室内评价

在进行无侵害钻井液体系室内性能评价试验时, 该公司研制应用了无侵害钻井液体系砂床滤失仪, 基本结构见图 1。

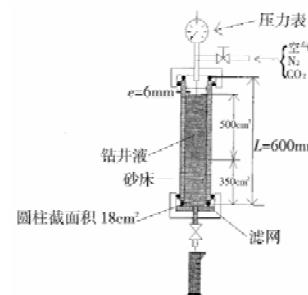


图 1 无侵害钻井液体系砂床滤失仪

由图 1 可以看出, 该砂床滤失仪与 API 室温常压滤失仪的结构是相似的, 仅仅是改变了过滤介质 (用 20~40 目砂子代替滤纸)、过滤面积 (18 cm<sup>2</sup>, API 滤失仪过滤面积为 44.5 cm<sup>2</sup>) 及装钻井液的体

收稿日期: 2005-04-12; 改回日期: 2005-10-16

作者简介: 张克勤 (1927—), 男, 1949 年毕业于西北大学化学系, 教授级高工。系本刊技术顾问。

联系电话: (010) 87184319

积 (500 mL, 原 API 滤失仪为 300~320 mL)。该滤失仪的突出特点是用砂床 (20~40 目砂) 代替滤纸作介质, 从而更接近于井下的实际情况。

表 1 20 种钻井液的 API 滤失量和砂床滤失量

序号	钻井液体系英文名称	中文名称	API 滤失量/mL	砂床滤失量/mL
1	water-based drill-in fluid (recently prepared)	水基钻井液 (新配)	2.0	0
2	1+filtrate-reducing polymer	1+聚合物降滤失剂	3.0	0
3	water-based drill-in fluid (recently prepared)	水基钻井液 (新配)	2.2	0
4	3+filtrate-reducing polymer	3+聚合物降滤失剂	2.0	0
5	water-based drill-in fluid (used in field work)	水基钻井液 (井浆)	2.6	108.0
5*	Repetition of the previous test	重复 5	2.7	146.0
6	water-based drill-in fluid (recently prepared)	水基钻井液 (新配)	2.8	3.0
7	polyglycol fluid (no barite)	聚合醇钻井液 (无重晶石)	4.2	125.0
8	polyglycol fluid (with barite)	聚合醇钻井液 (加重晶石至 1.20kg/L)	0.2	64.0
9	water-based polymer low-solids (rolled)	低固相聚合物水基钻井液 (热滚后)	27.0	149.0
10	water-based fluid saturated with $\text{CaCl}_2$	饱和氯化钙钻井液	36.0	150.0
11	water-based polymer low-solids (recently prepared)	低固相聚合物水基钻井液 (新配)	11.0	27.0
12	water-based polymer fluid-same as 12 (with barite-10ppg)	水基聚合物钻井液 (加重至 1.20kg/L)	8.0	0
13	drill-in oil-based fluid	油基钻井液	0	0
14	polyglycol fluid (no barite) +filtrate-reducing polymer	聚合醇钻井液 (无重晶石)	0.2	102.0
15	polyglycol fluid-same as 15 (with barite-10ppg) +filtrate-reducing polymer	聚合醇钻井液 (加重至 1.20kg/L)	0.5	17.0
16	water-based fluid for HTHP	高温水基钻井液	7.0	0
17	water + $\text{NaCl}$ -based fluid	盐水钻井液	2.6	24.0
18	water-based polymer low-solids fluid (recently prepared)	低固相聚合物水基钻井液 (新配)	6.2	0
19	water-based polymer low-solids fluid (rolled)	18 (热滚后)	7.4	0
20	water + $\text{KCl}$ -based fluid	氯化钾钻井液	3.4	0

从表 1 可以看出:

1) 同一钻井液的砂床滤失量和 API 滤失量差别很大, 几乎无规律可循, 有的比较接近, 有的又差别很大。

2) 新配浆的 API 滤失量与砂床滤失量可以对应, 而钻进井浆则有很大差别。这与我们以前的一些认识不同, 以前总认为钻井液 API 滤失量小就好, 而实际上在砂层中其滤失量可能又很大。

3) 加重的钻井液与高温钻井液的砂床滤失量较低, 而未加重的聚合醇钻井液与盐水钻井液有较高的砂床滤失量。这进一步说明了 API 滤失量与砂床滤失量的差别。

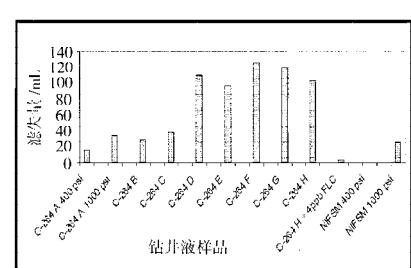
4) 油基钻井液与氯化钾钻井液有较好的砂床滤失量, 而新配低固相聚合物钻井液及其热滚后的砂床滤失量均较小, 与前面的结果恰恰相反。

5) 钻井液在加重至 1.20 kg/L 后砂床滤失量均有所降低, 这对油层来说, 有其有利的一面, 即减少了

为了证实这一改变的效果, 国外筛选了 20 种不同水基钻井液进行滤纸和砂床滤失量的对比试验, 结果见表 1。

图 2 超细碳酸钙对钻井液滤失量的影响

从图 2 可以看出, 现场钻井液中加有一定粒度的碳酸钙后, 其砂床滤失量有很大不同: A~C 为钻进前的滤失量, D~H 为钻进 12 h 后的滤失量, 可看出在钻进 12 h 后钻井液滤失量明显增加。当在其中加



1.5% 无侵害处理剂后, 滤失量明显降低, 而且在加压 7 MPa 后滤失量仍很低。这说明碳酸钙的缺点是: 当钻井液循环后, 由于摩擦改变了颗粒的粒度分布, 而使桥堵剂的堵漏效果降低, 并增加固相含量等。

### 3 国内无侵害钻井液研究现状

虽然我国对无侵害钻井液技术研究起步较晚, 但已研制出类似国外无侵害钻井液处理剂的降滤失剂, 并进行了现场试验且取得了良好的效果。另外在复配技术方面, 我国不仅有各类聚合物的复配技术, 更有磺化物的复配技术<sup>[7-8]</sup>。

#### 3.1 常用钻井液处理剂砂床滤失量的测试

国内部分科研机构利用砂床滤失仪对常用钻井液处理剂的砂床滤失量进行了测试, 结果见表 2。

表 2 国内常用钻井液处理剂的砂床滤失量测试结果

配 方	API 滤失量/mL	砂床滤失量
5% 基浆	29.3	全滤失
5% 基浆 + 3% SPNH	8.8	全滤失
5% 基浆 + 3% SMP-II	16.4	全滤失
5% 基浆 + 3% 聚合物	10.0	全滤失
5% 基浆 + 0.3% PAC141	8.4	全滤失
5% 基浆 + 0.3% 80A51	10.0	全滤失
5% 基浆 + 0.3% CMC-HV	9.0	全滤失
5% 基浆 + 2% 聚合醇	30.2	全滤失
5% 基浆 + 0.3% SPC	7.2	全滤失

表 4 我国无侵害钻井液部分现场试验数据

性 能	草 4-4 斜 211 井				辛 68-斜 125 井		
	井浆	混油 5.8 m <sup>3</sup>	+3 t 零渗透剂	完钻性能	井浆	+3 t 零渗透剂	完钻性能
密度/kg·L <sup>-1</sup>	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
漏斗粘度/s	50	71	/	68	50	/	68
API 滤失量/mL	3.6	2.4	1.8	2.8	4.0	1.9	2.6
泥饼厚度/mm	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3	0.4
静切力/Pa	1.5/2.0	3.0/4.2	4.0/10.0	4.0/6.0	1.5/2.0	4.0/10.0	4.0/6.0
含砂量, %	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
塑性粘度/mPa·s	11	18	29	22	12	21	22
动切力/Pa	5.0	12.5	14.0	11.0	5.0	11.8	11.0
pH 值	8	8	8	8	8	8	8
使用效果	自 800 m 起至井底, 井径规则接近一条直线, 平均井径 246.38 mm, 井径扩大率 0.01%				自 1400 m 起至井底, 井径规则接近一条直线, 平均井径 247.41 mm, 井径扩大率 0.17%		

#### 3.4 初步拟定了无侵害钻井液的标准

国外公司没有给出其无侵害钻井液处理剂的标准, 只有样品。国内各单位对无侵害钻井液处理剂都制定了自己的标准, 但未统一, 亦未列入我国标准化委员会申报。笔者对此进行了统计对比, 见表 5。

综上, 笔者建议无侵害降滤失剂标准应包括以下内容:

从表 2 可以看出, 国内常用的几种滤失剂的 API 滤失量与砂床滤失量确实存在很大差异。

#### 3.2 研制出无侵害钻井液处理剂

经过一年多的消化吸收, 我国已研制了一些类似国外无侵害钻井液处理剂的降滤失剂, 与国外同类产品的对比数据见表 3。

表 3 国内外部分无侵害钻井液处理剂试验数据

项 目	Φ 600/Φ 300	API 滤失量/mL	砂床滤失量/mL	侵入深度/mm
4% 基浆	6/4			全滤失
基浆 + 1% 国外样品	8/6	16.5	0	150
基浆 + 1% 国内样品①	12/8	10.0	0	300
基浆 + 1% 国内样品②	9/6	11.0	0	300
基浆 + 1% 国内样品③	8/5	10.0	0	230
基浆 + 1% 国内样品④	11/8	17.0	0	130

注: 基浆为 4% 钠膨润土浆。

从表 3 可看出, 我国的无侵害钻井液处理剂产品已与国外同类产品性能相当。

#### 3.3 进行了现场试验

我国自行研制的无侵害钻井液在多口井进行了现场试验, 并收到良好的应用效果。部分数据见表 4。

1) 理化指标。a. 外观; b. 水分; c. 细度; d. pH 值。

2) 钻井液性能。a. 基浆为 3%~5% 膨润土浆; b. 试样加量为 1%~2%; c. 测试温度为常温及高温 (150℃); d. 测试压力为 0.69~10.00 MPa; e. 利用湿砂或干砂观察测量渗透深度; f. 按现行标准进行渗透率试验。

表 5 国内无侵害降滤失剂标准汇总

序号	项目	国内样品 A	国内样品 B	国内样品 C	国内样品 D	国内样品 E	国内样品 F	国内样品 G
1	外观		黄色或棕褐色粉末		灰色粉末	黄褐色粉末	黄褐色粉末	
2	水分, %	≤12	≤12	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10
3	密度/kg·L <sup>-1</sup>					≥0.95		
4	细度(80 目筛筛余), %					≥10	≥10	≥10
5	pH 值 (1% 水溶液)			8.0~10.0		7.0~9.0	8.0~10.0	8.0~10.0
6	荧光级别	≤5	≤5					
7	油溶率, %				≥15			
8	酸溶率, %				≥30			
9	水溶率, %				≥10			
10	n 值						0.6~0.7	
11	砂床滤失量 <sup>①</sup> /mL			0		0	0	
12	砂床滤失量 <sup>②</sup> /mL			0		0	0	
13	砂床滤液进入深度/cm	6	8					
14	砂床滤失量 <sup>③</sup> /mL						0	
15	砂床滤失量 <sup>④</sup> /mL						0	

注: 国内已做了一些承压试验及渗透率恢复率试验, 尚未有统一数据; ①为 5% 基浆 + 2% 样品; ②为 5% 基浆 + 2% 样品, 测试条件为 150°C / 16h; ③为清水 + 5% 样品; ④为清水 + 5% 样品, 测试条件为 150°C / 16h。

### 3.5 对国外仪器进行了改进并进行了试验

为了验证无渗透处理剂的应用效果, 国内不仅利用钻井液用高温高压滤失仪、动态滤失仪、固井用高温高压仪等仪器和设备进行了试验, 还改装设计了新的可耐高压的压滤器(已约有 3~4 种), 图 3 为一种比较好的改进型砂床滤失仪结构, 其主要技术指标为: 砂床 35 mL (50 g), 钻井液量 200 mL, 耐压可达 25 MPa, 试验温度可达 180°C, 可模拟返排试验。

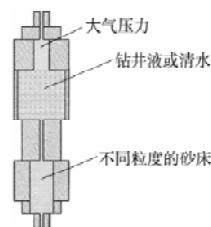


图 3 改进型砂床滤失仪

国内科研人员利用相关仪器和设备进行了一系列室内试验, 结果见表 6~表 9。

表 6 不同基浆、不同加量、不同砂床条件下的滤失量

试验液	无侵害处 理剂加量, %	试验压力 /MPa	滤失量/mL		
			20~40 <sup>①</sup>	40~60 <sup>①</sup>	60~80 <sup>①</sup>
4% 基浆	0	0	全滤	全滤	全滤
	1.0	0.7	24	6	0
		5.0	全滤	26	0
	1.5	0.7	4	0	0
5% 基浆	0	0	全滤	0	0
	1.0	0.7	16	0	0
		5.0	65	5	0
	1.5	0.7	5	0	0
		5.0	48	0	0

注: ①表示砂床中砂子的粒度, 目。

表 7 井浆在加入无侵害处理剂前后的砂床滤失量

砂床	滤失量/mL		
	A	B	C
20~40 目砂	55	0	0
60~80 目砂	1	0	0
10~100 目砂	9	0	0

注: A 为井浆; B、C 为井浆 + 1.0% 无侵害处理剂, 试验压力分别为 0.7 和 5.0 MPa; 井浆为华北油田肃宁留 108 探井完井井浆 200 mL, 砂床高度 7.5 cm (48 g 砂)。

表 8 不同钻井液在加入无侵害处理剂前后的砂床滤失量

试验液	砂床	滤失量/mL	
		A	B
5% 基浆	80~100 目砂	200	0
井浆	10~40 目砂	200	0
油基钻井液	10~40 目砂	200	0

注: A 未加无侵害处理剂, B 加入 1.5% 无侵害处理剂, 试验条件为室温、5% 基浆 200 mL、砂床 7.5 cm、30 min。

表 9 试验温度对砂床滤失量的影响

试验温度/°C	砂床	试验液	滤失量/mL	
			A	B
100	80~100 目砂	5% 基浆	165	0
		井浆	0	0
		油基钻井液	0	0
150	20~40 目砂	5% 基浆	200	30
		井浆	85	8
		油基钻井液	35	5

注: A 未加入无侵害处理剂; B 加入无侵害处理剂, 试验条件为试验液 200 mL、砂床 7.5 cm (48 g 砂)、30 min。

由表 6 可看出, 不同基浆、不同加量、不同砂床

时,所测出的数据与预想的相符。即基浆含土量多者滤失量少,砂床目数变细者,滤失量变少,而压力增加时,滤失量增多。这说明改进的仪器是可用的。

由表7可以看出,井浆加入处理剂前后砂床滤失量有很大差别。

由表8可以看出,不论是何种钻井液,不同目数砂床,加有处理剂后砂床滤失量均有很大差别。

由表9可看出,随着温度的增加,不论是何种钻井液,或不同目数砂床,砂床滤失量均增多。

## 4 结论及展望

1) 国外在水基无渗透钻井液配方的组合上有了很大进步,仅用3~4种处理剂,并提出了一袋化的口号。我国形成的“聚磺钻井液”仍需要7~10种处理剂,有一定差距。

2) 我国虽已研制出类似国外无渗透处理剂的产品,但在机理方面还需深入的探讨,如成膜机理及油层保护机理等,以期真正达到无侵害钻井液的实质。另外对堵漏剂、润滑剂亦应在我国已有基础上进一步研究。

3) 无渗透钻井液体系的开发和应用能否称得上是井壁稳定技术的一大进步?以前的水化膨胀、半透膜、渗透理论、毛细管效应、活度、双电层等理论如何正确评价和应用?是否只用了一种“隔离墙”的办法就可以解决全部井壁失稳定的问题?这些都需要进一步研究。

4) 近期在井壁失稳机理方面提出了更多的因素和新的解释,如:地热作用、受压的页岩、钻具的震动、结晶水、压力波动和抽吸、泵造成的循环停止以

及处理剂的物理化学作用等,应如何认识、消化?

5) 井壁稳定的研究方法经历了从化学因素、力学因素到化学与力学耦合因素的过程,无渗透钻井液技术的提出,是不是标志着发展到了物理因素为主的趋向?

6) 成膜、封堵技术的研究是不是一个控制井壁失稳的方向?应该加强这一领域的研究。

7) 利用砂床进行滤失量的考核很有必要,应推广普及。

8) 在形成无渗透钻井液配方的方案选择上应该是聚磺(聚合物+磺化物)向聚堵(聚合物+封堵剂)转化。

## 参 考 文 献

- [1] Helio Santos. No-damage drilling: how to achieve challenging goal? [R]. SPE 77189.
- [2] Reid P, Santos H. Novel drilling, completion and workover fluids for depleted zones: avoiding losses, formation damage and stuck pipe [R]. SPE/IADC 85326.
- [3] Helio Santos. What have we been doing wrong in wellbore stability? [R]. SPE 69493.
- [4] Helio Santos, Villas-Boas M B, Lomba R F T, et al. API filtrate and drilling fluid invasion: is there any correlation? [R]. SPE 53791.
- [5] Semmelbeck M E, Dewan J F. Non invasion-based method for estimating permeability from logs [R]. SPE 30581.
- [6] Franck Labenski, Paul Reid. Drilling fluids approaches for control of wellbore instability in fractured formations [R]. SPE/IADC 85304.
- [7] 徐同台,崔茂荣.钻井工程井壁稳定的技术[M].北京:石油工业出版社,1999.
- [8] 赵忠举.21世纪钻井液新技术[M].北京:石油工业出版社,2004.

## Advances and Trends in Non-Invasive Drilling Fluids Technologies

Zhang Keqin<sup>1</sup> Liu Qinglai<sup>2</sup> Yang Zichao<sup>2</sup> Tang Hong<sup>3</sup> He Jianjun<sup>3</sup>

(1. Petroleum Exploration & Development Institute, CNPC, Beijing, 100083, China; 2. Northwest Branch Company of Sinopec, Urumqi, Xinjiang, 830011, China; 3. Tarim Oilfield Branch Company, CNPC, Kuerle, Xinjiang, 841000, China)

**Abstract:** DWC2000, a non-invasive drilling fluid developed by EDTI Company in US, consists of FLC-2000 (a dynamic fluid loss reagent), LCP-2000 (a lost circulation material) and KFA-2000 (a lubricant). Through actions of physical chemistry and surface chemistry, the drilling fluid can form blocking membrane on well wall to reduce dynamic filtration. Good results can be achieved especially for fresh water, brine, saturated brine and oil-based drilling fluids. The working temperature of the fluid is up to 204 °C. The addition of 1%~2% DWC2000 can effectively reduce dynamic fluid loss and improve permeability recovery. In the article, a sand-bed fluid loss test device and its measuring method are presented. The comparisons of API filtration losses and sand-bed ones of 20 kinds of drilling fluids are also made. Major advances in non-invasive drilling fluid technologies in China are introduced in detail. In addition, its prospects are also presented.

**Key words:** non-invasive drilling fluid; filtration rate; sand-bed filtration; drilling fluid additive; formation damage prevention