

文章编号:1001-5620(2005)03-0062-04

# 国外无侵害钻井液技术

刘保双<sup>1</sup> 曹胜利<sup>1</sup> 景暖<sup>2</sup>

(1. 胜利石油管理局钻井工艺研究院油化所, 山东东营; 2. 华北油田公司采油工艺研究院, 河北任丘)

**摘要** 介绍了国外无侵害钻井液体系的技术背景, 论述了防止钻井液侵入储层技术的发展和无侵害钻井液技术的形成过程, 分析了无侵害钻井液的技术关键和封堵机理, 并简要介绍了无侵害钻井液组成。该钻井液体系的主要处理剂——无侵害钻井液降滤失剂 FLC2000 由一系列可溶于油和水的改性聚合物混合而成, 这些聚合物具有较宽的 HLB 值, 当加入到水基钻井液中时, 混合物中一些聚合物溶解, 类似于常规降滤失剂, 可以控制滤失量; 而另外一些组分由于其亲油性, 只能部分溶解, 这些聚合物组成可变形的胶束, 在孔喉和微裂缝中快速形成低渗透阻挡层, 有效地阻止液体侵入。基于上述钻井液组分的作用机理, 无侵害钻井液在防止地层伤害、防止衰竭地层的压差卡钻、防止钻井液漏失、提高地层承压能力、控制微裂缝地层的不稳定性等方面具有独特优点。最后总结了国外保护储层钻井液的发展方向。

**关键词** 钻井液 防止地层损害 无伤害 无侵害 无渗透

**中图分类号**: TE254.3

**文献标识码**: A

钻井过程中的油层保护工作是油层保护系统工程的一个环节, 钻井过程中的储层伤害不但影响油井的初期产量, 而且还影响后续作业的损害程度和作业效果。因此, 钻井过程中的油气层保护工作至关重要, 一直深受重视。近年来, 无论是在钻井液储层伤害机理方面, 还是在防止储层伤害方法以及储层保护钻井液技术方面都取得了很大进展。这里主要介绍一种国外较新的保护储层钻井液技术——无侵害钻井液技术。

## 1 无侵害钻井液新概念的提出

众所周知, 用常规钻井工艺钻井, 过平衡压力经常引起钻井液侵入储层, 进而降低储层的渗透率。为了减少钻井过程中的油层伤害, 开发出了一种井眼内液柱压力低于地层孔隙压力的钻井方法, 称为欠平衡钻井。在整个钻井和完井期间, 如果在钻井液接触储层的全部时间内都可以避免过平衡压力的话, 那么, 欠平衡钻井确实不会产生储层伤害。但是, 在钻井和完井期间, 往往存在很多情况, 难以时刻保证欠平衡压力。其原因很多, 首先, 因为大多数欠平衡钻井是通过注入气体来减少井筒内液柱压力的, 气体的注入产生一个由于环空多相流动导致的

井底压力震荡, 有时这种震荡很大, 致使所有时间都保持井底欠平衡条件非常困难; 第二, 因为在钻井和完井过程中, 有些工序(如测井等)不能采取欠平衡方式; 第三, 有时由于井眼不稳定问题, 必须提高井眼内液柱压力以平衡地层应力等。

不管是什么原因限制了欠平衡钻井, 面对的问题总是如何钻开储层才能使伤害程度最小。随着欠平衡钻井的普及, 人们更加清楚认识到提交一口无伤害油井的重要性。在任何情况下, 采油部门要求施工者交付接近于零伤害的油井。在无法采用欠平衡钻井情况下, 用传统的钻井液来达到无伤害的目的非常困难。为减少油层伤害, 提出了一种新的钻井液——无侵害钻井液(Non invasion fluid)<sup>[1]</sup>。

值得注意的是, 所谓的“无侵害钻井液”是为了与常规钻井液体系区分而言的, 不能理解成这种钻井液没有任何程度的侵入。无侵害钻井液应该被认为是超低侵害的钻井液体系<sup>[2]</sup>。

## 2 暂堵技术的发展与无侵害钻井液技术的产生

过去, 对过平衡条件下的钻井液伤害油层机理进行了大量的研究, 主要储层伤害机理有孔隙喉道

的物理堵塞和缩小(固相侵入、微粒运移、聚合物侵入、粘土膨胀、结垢等)以及相对渗透率变化(液锁、乳化、润湿反转)等。不管储层潜在什么伤害机理,总是首先考虑减少钻井液侵入储层。因此,如何避免钻井液侵入储层,一直是油层保护研究的重点,也由此开发了多种防止钻井液侵入储层的方法。

### 2.1 传统的颗粒架桥方法

为了减少钻井液侵入储层,最常用的办法是在钻井液中添加颗粒以桥堵孔隙喉道。添加的颗粒一般为可溶性材料(油溶、水溶和酸溶),以便在投产或增产作业时非常容易地除去。目前最常用的材料是超细碳酸钙和氯化钠颗粒。

架桥方法要求颗粒在岩石较浅部位就能找到适合于架桥的孔隙尺寸。架桥发生在什么地方以及效果如何取决于打开油层瞬间钻井液中的颗粒尺寸分布。如果颗粒尺寸与孔隙尺寸不匹配,就不能有效地架桥,钻井液就会侵入储层深处。因此,架桥颗粒粒度的级配一直受油层保护工作者所重视,并提出了优选架桥颗粒的各种原则或理论,为优选暂堵钻井液起了很大作用,但仍然存在如下问题:①这些架桥理论对孔隙尺寸分布已知的均质地层,可有效地优选架桥颗粒,但多数渗透性地层是非均质的,孔隙尺寸分布在垂直方向和水平方向都是变化的,要使钻井液中的颗粒尺寸分布比较合适,是非常困难的。②架桥颗粒不断受到钻头和泥浆泵的研磨,而且其它颗粒(如钻屑)也不断混入钻井液中,所以钻井液的颗粒尺寸分布在钻井过程中是不断变化的。因此,即便能够配制出能有效封堵储层的钻井液,但这种钻井液的颗粒尺寸分布也很难维持。

### 2.2 泡沫流体

泡沫是气体分散在液体中形成的分散体系,泡沫是在连续网状液膜内包含空气气泡的高结构流体。流体的结构特性以及空气气泡较宽的尺寸分布使得泡沫流体具有桥堵较宽范围孔隙尺寸的能力,甚至可用来桥堵小裂缝。但是,泡沫也有一些缺点:①需要专门设备产生泡沫,这些设备很昂贵,在海上还要受到甲板有限空间的限制;②泡沫是可压缩的,在井下条件下会失去部分甚至全部的结构,当然,也同样失去架桥特性。

最近,一种新型的称为“微泡”的泡沫流体发展很快。简单地说,这种“微泡”钻井液是含有增粘剂、表面活性剂以及适当的加重剂的水基流体。所用的

表面活性剂使空气进入流体中(借助于增粘剂)形成稳定的厚壁泡沫,这种泡沫能够形成阻挡层,阻止流体侵入近井地带,因此,能控制油层伤害。但是,也存在一些问题限制它们的广泛应用。首先是当“微泡”受到的压力超过临界值时,泡沫破裂且溶解进基液中,因此流体全部丧失含有架桥气泡的任何优点。其次,相当高浓度的表面活性剂增加了油层伤害,特别是对相对渗透率的影响。

### 2.3 用可变形材料控制侵入

自 1977 年 Anrams 提出了 1/3 架桥规则以后,人们开始认识到,要防止钻井液进入储层,用于暂堵剂的颗粒尺寸必须在一个合适的范围内。几十年来,桥堵孔隙作为限制流体侵入地层的方法经历了长期发展过程。最早,石油工业开发了粒度级配的钻井液,以尽快且有效地封堵孔隙喉道。但是最近的研究认为,尽管使用超细碳酸钙具有酸化解堵的优点,但是由于它是一种质脆且几乎不可压缩的无机矿物,因而在正压差作用下,其颗粒在孔喉或裂缝处仅能起一种架桥作用,难以通过变形起到有效的封堵作用。同时,碳酸钙颗粒的脆性使其在长时间的循环过程中容易被磨细而侵入深部地层,而且这种颗粒只有在较高的钻井液固相情况下才能起到暂堵作用。因此目前国外提出了可变形材料的暂堵技术。微泡就属于这种可变形材料的一种。泡沫钻井液的优点就在于含有这种既具有较宽的颗粒尺寸分布又是可变形的粒子。但是这种方法也不能完全解决大多数产层的侵入和伤害问题。

由于颗粒架桥和泡沫架桥两种方法的局限性,人们开始研究过平衡条件下控制侵入储层的“理想”钻井液。这种“理想”钻井液应具备下列功能:①在不改变钻井液配方的情况下,钻井液能够桥堵较宽范围的孔隙喉道;②桥堵速度很快,而且阻挡层深度接近岩石表面;③在完井和生产过程中,阻挡层必须很容易除去;④钻井液必须是无伤害的;⑤形成的阻挡层在较高的过平衡压力和较高的温度下仍起作用。⑥适合于油基、水基等各种类型钻井液;⑦钻井液配制容易,维护简单;⑧所有钻井液处理剂都必须是无毒、无害、使用安全、符合人类健康要求。然而,要满足以上所有要求是极其困难的,美国 EDTI 公司筛选了许多处理剂和钻井液体系,优选出了“无侵害”钻井液(NIF)。在现场应用之前,通过室内实验和现场应用,证明了这种钻井液能满足上述要求。

无侵害钻井液体系实际上是由一系列水溶和油

溶聚合物组成的混合物,聚合物有范围很宽的 HLB 值。当添加到水基钻井液中时,这种聚合物聚集成可变形的集合体或胶束,在过平衡压力驱动下,钻井液开始进入渗透性储层,这些胶束很快在孔隙喉道上形成低渗透阻挡层,限制了钻井液的进一步侵入,而且形成阻挡层的胶束是可变形的,当压力升高时,能更进一步压缩和减少阻挡层的渗透率。

封堵材料的可变形能力和较宽的尺寸分布使它们具备了比特定尺寸桥堵颗粒更宽和更有效的封堵能力,使这种材料成为比颗粒材料更有效的封堵剂。这种处理剂既具有油溶性又具有水溶性的特点,无论在油基钻井液、合成基钻井液中,还是在水基钻井液中,都具有相同的封堵效果。

### 3 无侵害钻井液体系的组成

无侵害钻井液主要由三种成分组成<sup>[4]</sup>:增粘剂 DWC2000,动态滤失降低剂 FLC2000 和润滑剂 KFA2000。另外还有一种产品是 LCP2000,这种产品是在遇到严重井漏时应用的堵漏材料,如果钻裂缝和溶洞性地层时,应该储备这种产品,一旦发生严重井漏,立即加入这种产品用来尽快恢复循环。

### 4 封堵作用原理<sup>[3]</sup>

该钻井液体系的主要处理剂——降滤失剂 FLC2000 是由一系列可溶于油和水的改性聚合物混合而成,这种聚合物具有较宽的 HLB 值,当加入到水基钻井液中时,混合物中一些聚合物溶解,类似于常规降滤失剂,可以控制滤失量;一些组分由于其亲油特性只能部分溶解;这些聚合物组成可变形的胶束,这些胶束可以在孔喉和微裂缝中快速形成低渗阻挡层,有效地阻止液体侵入。

粒径分析结果表明,这种胶束的粒径范围由几微米到 1000 微米( $d_{50}$  为 60  $\mu\text{m}$  左右, $d_{10}$  为 9  $\mu\text{m}$ , $d_{90}$  为 340  $\mu\text{m}$ )。该材料快速形成富含胶束的低渗阻挡层,提供侵入控制能力,这样就大大减少了钻井液进一步侵入储层。形成阻挡层的这种胶束是可变形的,因此,如果压力升高,它们就会收缩,并进一步降低阻挡层渗透率。在某些方面,这种胶束产生像逆乳化油基钻井液中小水珠那样的作用,这些小水珠集中在滤饼上,对控制侵入起主要作用。胶束的优点在于胶束更易变形和尺寸范围更宽;因而能在更宽的孔喉尺寸范围内起封堵作用。

混合物既有油溶性也有水溶性,因此,这种添加剂在油基或合成基钻井液中的作用与在水基钻井液

中的作用相同;在油基流体中,油溶性成分溶解,而水溶性成分形成胶束。在储层应用这种添加剂,阻挡层的清除非常简单,因为在流体中,胶束只有在高于临界浓度下存在,因而当这种聚合物接触洗井液(或完井盐水)时,以及采油时与储层流体接触时,阻挡层可以直接分散到井眼流体中,从而清除阻挡层。

## 5 无侵害钻井液的特性

### 5.1 防止地层伤害<sup>[1,2,4]</sup>

无侵害钻井液的概念集中在尽可能减少钻井液滤液侵入上。形成胶束的处理剂与普通钻井液处理剂是相容的,因此,这种处理剂在不降低侵入控制效果的情况下,也能控制滤液侵入伤害。

无侵害钻井液的一个重要特点就是能在裸露的岩石表面很快地形成胶束低渗透率阻挡层。这就意味着固体和大部分聚合物都被阻挡,不能进入孔隙,滤液仅仅侵入岩石内部很短的距离。无侵害钻井液形成的阻挡层位于岩石表面,在渗透率恢复实验中,初始流动压力很低,渗透率恢复值很高。由于阻挡层位于井壁,所以可以很容易地通过清洗除去滤饼。

要建立有效的保护性阻挡层,必须添加足够的动态滤失降低剂。在低固相钻井液中,该处理剂的浓度要求达到 19.97  $\text{kg}/\text{m}^3$  或 22.83  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,而高固相钻井液中加量可减少到 8.56~14.27  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。最合适的浓度应通过砂床实验决定。

### 5.2 防止衰竭地层的压差卡钻<sup>[2,4]</sup>

一旦钻柱接触到渗透性地层,钻井液的过平衡压力就作用在钻柱上,迫使钻柱紧贴井壁。如果这个压力足够大,而且滤饼在钻柱周围形成较大包角,往往会发生压差卡钻。影响压差卡钻的一个重要因素就是钻井液滤饼的厚度,滤饼厚度增大,滤饼与钻杆的接触面积增大,因此更容易发生卡钻。无侵害钻井液以两种方式有利于防止压差卡钻。第一,快速形成低渗透阻挡层,减少了井眼压力对地层的影响。第二,由于形成低渗透阻挡层,滤饼厚度就不能象普通钻井液那样迅速增加。因此,当应用无侵害钻井液时,减少了压差卡钻的危险性。

### 5.3 防止钻井液漏失<sup>[2,4]</sup>

混合聚合物形成的胶束提供了一个较宽的尺寸分布,因此,这种处理剂可在较宽尺寸范围内,对孔隙起作用,甚至包括微裂缝,这使得同样组分的流体能够有效地封堵更宽尺寸范围的地层。砂床的室内

试验已经证明,无侵害钻井液能有效封堵渗透率高达  $20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的渗透性地层。

在适度过平衡压力下钻进强度弱的地层或在过平衡压力较高的情况下钻进衰竭地层时,往往存在产生裂缝和钻井液严重漏失的危险性。无侵害流体能减少这种危险性。用岩石力学理论可以解释无侵害钻井液低渗透率阻挡层是如何增加地层破裂压力梯度的:①在井壁上或近井壁带渗透率非常低的阻挡层能把孔隙流体与井眼流体隔离,流体很难进入地层,孔隙压力不会上升到常规流体那么大,有效应力不会减少,井眼不易破裂;②如果强度弱的地层产生裂缝时,无侵害流体中的胶束会在裂缝上形成一个阻挡层。因此,如果产生裂缝,裂缝的延伸会减慢或停止,从而防止或减少钻井液漏失。

#### 5.4 增加地层泄漏压力,提高地层承压能力<sup>[2,5]</sup>

在钻井过程中,低泄漏压力往往引起许多严重问题,如需要过多的套管柱,增加井涌的危险性等。事实上,不管压力值有多大,当孔隙压力与泄漏压力差值较小时,就会发生危险。钻井中真正的关键是油井裸眼井段最低的泄漏压力值。这个值通常比破裂压力梯度低,但是,正是这种泄漏压力,确定了钻井液密度窗口、井身结构等。当钻进渗透性地层时,泄漏压力值经常降低到难以承受的程度。在这种情况下,要继续钻井通常要求下一层套管,或者带着渗漏钻进,都会增加不能钻达目的层的危险。

随着石油勘探的进行,钻井环境越来越具有挑战性,在复杂地区钻井面临着很多困难。特别是井底压力非常接近裸眼井段的最低泄漏压力时,经常遇到井涌/井漏并存的复杂情况,因此经常面临昂贵和危险的井控条件。近10年,井控技术和程序已有很大发展,但是,较好的方案仍然是井眼内的压力提高到一个值,为继续钻进提供一个较好的钻井液密度窗口。实现该方案的最简单方法就是提高暴露在同一个裸眼井段各地层的泄漏压力。

这种无侵害钻井液能在地层上形成一种具有独特表面化学特性的密封隔膜,有效地封堵较宽范围的渗透性地层。与传统钻井液相比能更简单、更有效地实现提高泄漏压力的目标。

#### 5.5 控制微裂缝地层的不稳定性<sup>[3]</sup>

微裂缝地层的主要破坏机理是,一旦钻开井眼,在过平衡条件下微裂缝首先与钻井液接触,而钻井液侵入微裂缝增加了井眼中裂缝的压力。由于无法

受到钻井液液柱压力的支撑,地层完整性因裂缝摩擦角的降低而变弱。井眼在自然垮塌,或在受到诸如停止循环、起下钻、划眼及钻具碰撞等活动的扰动后,就会失去稳定性。所以控制微裂缝地层的不稳定性关键在于避免钻井液侵入微裂缝。

无侵害钻井液含有一种可形成坚固低渗阻挡层的材料,并且它能够隔离微裂缝中的流体和井筒压力,从而保护地层,允许提高钻井液的过平衡程度,而不用担心在易碎地层引起不稳定或循环漏失。因此,如果形成阻挡层,钻井液密度可以像非裂缝地层那样处理井眼不稳定问题。

#### 5.6 工艺简单,安全环保<sup>[4]</sup>

另外该钻井液体系还有配制简单,维护方便,对人类的健康无害,有利于环境保护等优点。

## 6 结束语

20世纪90年代以来,国外储层保护钻井液技术进入不断完善阶段,即面对不断出现的新问题,不断完善、改进储层保护钻井液技术。近年来,国外储层保护钻井液技术不管是在伤害机理研究方面,还是在防止油层伤害的方法以及新型无伤害钻井液类型上,都取得了很大进展。目前这项技术正在从单一技术向综合技术发展,新研制的储层保护钻井液不但体现了各种复杂情况下的油层保护技术,还综合体现了经济效益、环境保护、深井高温、井下安全、人身健康和使用方便等方面的技术。非侵害钻井液体系就体现了这一特点。

### 参考文献

- [1] Helio Santos and Jesus Olaya. No-Damage Drilling: How to Achieve this Challenging Goal?. *SPE* 77189, 9~11
- [2] Reid P and Santos H. Novel Drilling, Completion and Workover Fluids for Depleted Zones: Avoiding Losses, Formation Damage and Stuck Pipe. *SPE/IADC* 85326
- [3] Franck Labenski, Paul Reid SPE and Helio Santos SPE, Impact Solutions Group. Drilling Fluids Approaches for Control of Wellbore Instability in Fractured Formations. *SPE/IADC* 85304
- [4] WAJID RASHEED; Mud, glorious mud!. *Ht's e&p* March 2003
- [5] Helio Santos. What Have We been doing wrong in well bore stability?. *SPE* 69493, March 2001
- [6] Helio Santos. Increasing Leakoff Pressure With New Class of Drilling Fluid. *SPE/ISRM* 78243, 20~23

(收稿日期 2004-09-22; HGF=053L4; 编辑 李晓岚)