

21世纪初 国外钻井液 和 完井液技术

徐同台 赵忠举 主编



石油工业出版社

21 世纪初

国外钻井液和完井液技术

徐同台 赵忠举 主编

石油工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

21 世纪初国外钻井液和完井液技术/徐同台等主编.
北京: 石油工业出版社, 2004.4
ISBN 7-5021-4618-0

I .2...

II . 徐...

III . ①钻井液-技术-国外-现代

②完井液-技术-国外-现代

IV . TE25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 030366 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.cn

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂印刷

2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 28.5

字数: 726 千字 印数: 1—1500 册

定价: 70.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

21 世纪是一个知识经济时代。为迎接挑战,寻求发展机遇和增强自身的竞争力,全球各大石油技术服务公司都在千方百计进行技术创新,使石油钻井领域的新理论、新设备和新工艺的研发和更新速度加快。近年来,钻井领域出现了大位移井钻井、欠平衡钻井、多分支井钻井、连续管钻井和膨胀管钻井等一系列钻井新技术。这些钻井新技术的问世,推动了相关技术特别是钻井液和完井液技术的发展。

在钻井液和完井液领域,国外的钻井液服务公司在符合环保要求、防止地层损害、稳定井壁、适应高温高压恶劣环境、防漏堵漏、钻井液管理等方面进行了集中研究,并取得突破性进展。例如,最近研制出的无损害钻井液、微泡钻井液、硬葡聚糖打开油层钻井液、充氮泡沫钻井液等一系列新型钻井液,为防止地层损害、增产增储提供了新的手段;又如,近几年研制成功的聚合醇钻井液、甲酸盐钻井液、合成基钻井液和水基深井钻井液等新型钻井液,满足了环保、稳定井壁和应付恶劣钻井环境的要求,推动了钻井技术的发展。

为了让大家了解国外钻井液和完井液的最新发展情况,我们组织专家编写了本书,目的是把国外 21 世纪的钻井液和完井液新技术介绍给大家,它山之石可以攻玉,起到借鉴和参考的作用。

本书共分十章。第一章由鄢捷年、吴彬、马学勤编写;第二章由鄢捷年、吴彬、刘波、赵凤兰、马学勤、郭健康编写;第三章由朴昌浩编写;第四章 一由徐家放、邱正松编写,第四章 二由张克勤、方慧、刘颖、秦里曹编写,第四章 三由程远方编写;第五章 一由李君勋、姚少全、童云、郑力会、刘忠华、李妍媛编写,第五章 二由徐同台、陈乐亮、赵忠举编写,第五章 三由孙明波编写,第五章 四、五由朴昌浩编写,第五章 六由孙金声、袁春、王富华编写,第五章 七由袁春、孙金声编写;第六章由张克勤、徐同台、王奎才、门廉奎、孙延平、夏芳编写;第七章由陈乐亮编写;第八章由李君裕编写;第九章由赵雄虎编写;第十章由徐同台、赵忠举、袁春编写。全书由徐同台和赵忠举审定。

本书编写过程中,塔里木石油勘探开发指挥部工程技术服务公司塔里木泥浆公司、冀东油田分公司勘探开发工程监理公司、青岛海通达专用仪器厂等给予了大力支持与帮助,在此深表感谢。

由于时间仓促和水平有限,本书难免不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2004 年 1 月 31 日

目 录

第一章 特殊工艺井钻井液技术^[1~19]	(1)
一、水平井钻井液技术新进展	(1)
二、大位移井钻井液技术新进展	(10)
三、小井眼钻井液技术新进展	(22)
四、适用于其他特殊工艺井的钻井液新技术	(25)
第二章 保护油气层钻井液和完井液技术^[1~5]	(32)
一、油气层损害评价新方法及其应用	(34)
二、油气层损害机理研究的新进展	(41)
三、保护油气层的钻井液完井液新技术及应用	(50)
四、欠平衡钻井液完井液新技术及其应用	(75)
第三章 深井、超深井钻井液技术^[1~2]	(79)
一、国外新型抗高温合成聚合物的研制和应用	(80)
二、国外两口特超深井的钻井液使用情况	(81)
三、高固相解絮凝聚合物(HSDP)钻井液体系	(84)
四、皂石—海泡石聚合物钻井液体系	(88)
五、分散性褐煤—聚合物钻井液体系	(92)
六、流变性能稳定的无毒高温水基钻井液体系	(96)
七、高温高压条件下使用的石灰基钻井液体系	(105)
八、新型抗钙聚合物钻井液体系	(111)
九、抗高温钙处理钻井液体系	(116)
十、高密度高温水基钻井液体系	(124)
十一、合成基钻井液在墨西哥湾超深井中的应用	(128)
十二、高温稳定的无铬膨润土钻井液体系	(134)
第四章 井壁稳定技术	(143)
一、国外井壁稳定技术研究新进展 ^[1~15]	(143)
二、国外水基钻井液半透膜研究概述 ^[16]	(152)
三、国外井壁稳定力学研究新进展 ^[17~45]	(161)
第五章 新型钻井液	(220)
一、有机盐钻井液与完井液技术 ^[1~16]	(220)
二、甲酸盐钻井液和完井液的研究与应用 ^[17~31]	(242)
三、聚合醇钻井液 ^[32~54]	(265)
四、硅酸盐钻井液新理论与新技术 ^[55,56]	(273)
五、新型氯化钙钻井液体系在墨西哥湾深海钻井中的应用 ^[57]	(293)
六、合成基钻井液 ^[58~68]	(302)
七、国外油基钻井液新发展 ^[69~86]	(311)

第六章 国内外钻井液处理剂 20 年发展分析	(323)
一、国外钻井液处理剂 20 年发展情况	(323)
二、国内处理剂使用情况分析	(330)
三、结论	(343)
第七章 预防与处理井漏工艺技术的新进展^[1~12]	(389)
一、堵漏基本原则	(389)
二、石墨炭堵漏剂	(389)
三、新型花生壳堵漏剂	(394)
四、用于封堵大裂缝、洞穴、溶洞等储层漏失的化学交联球 (CACP)	(395)
五、处理灰岩裂缝井漏的几种新型堵漏剂	(398)
六、新型剪切敏感堵漏液 (SSPF)	(400)
第八章 钻井液固相控制系统及设备的发展^[1~16]	(403)
一、国外钻井液固控系统的发展	(404)
二、新型固控设备	(416)
第九章 钻井废弃物的处理综述^[1~20]	(421)
一、废弃钻井液的成分及对环境的影响	(422)
二、国内外处理废弃钻井液的一般方法和技术	(422)
三、特殊井场上钻井废弃物的处理	(428)
四、钻屑的利用	(429)
五、改进方法优化环境管理	(430)
第十章 2003 年国外钻井液和完井液技术的新进展^[1~6]	(433)
一、防止油气层损害	(433)
二、井壁稳定	(436)
三、新型钻井液	(440)
四、钻井液管理	(446)

第一章 特殊工艺井钻井液技术^[1~19]

在油气勘探开发过程中,钻井是必不可少的基本环节。目前石油工业的特点是,随着勘探开发的难度越来越大,投入的成本越来越高。这种新形势对石油工业提出了两个基本要求:一是要求技术进步,以满足越来越高的难度需求;二是要求降低成本,以适应目前油价体系的需求。在勘探开发过程中,钻井投资往往占总投资的三分之一至三分之二。因此,提高钻井技术、降低钻井成本成了第一位应该考虑的问题。正是在这种背景下,特殊工艺井钻井技术应运而生。

进入 20 世纪 90 年代后,水平井技术、老井重钻技术、复杂结构井(如多分支井、三维多目标井等)钻井和完井技术、高温高压钻井技术、深井超深井钻井技术、连续管钻井技术、小井眼钻井技术、欠平衡钻井技术以及保护油气层技术等,在国外已经成熟或正在发育成熟,并将在 21 世纪发挥重要作用。

一、水平井钻井液技术新进展

水平井钻井技术是在定向井钻井技术的基础上发展起来的,它是指在石油钻井过程中,通过控制钻头钻进的轨迹,使之沿油层的走向钻进,以最大限度地增加油层的泄油面积,提高油田采收率和勘探效果。20 世纪 80 年代,水平井钻井技术突飞猛进、迅速发展,在油田的勘探开发中发挥出越来越大的作用。

针对水平井突出的钻井问题,目前国外水平井钻井过程中普遍采用的钻井液体系主要有五种:聚合物钻井液、油基钻井液、清洁水(盐水)钻井液、混合金属层状氢氧化物钻井液以及泡沫或充气钻井液。

(一) 水平井钻井液技术发展概况

1996 年,著名钻井液专家 R.Caenn 和 G.V.Chillingar 著文对近年来钻井液技术发展概况进行了综述。他们指出,纵观 20 世纪 90 年代的钻井液技术,一是注重环保型钻井液的研制,二是重视发展水平井、大位移井等特殊工艺井的钻井液技术。对于水平井钻井液技术来说,近年来的主要进展体现在井眼净化、井壁稳定、润滑、储层保护以及有利于环境保护的处理剂和新型钻井液体系的研制等方面。

1. 钻井液处理剂

多年来,研究工作者一直在致力于研究如何改善钻井液的性能,人们按照 API 标准测试程序来研究新的钻井液处理剂,改善钻井液的一种或几种特性,其中主要是对聚合物的改进。聚合物的严格定义是相对分子质量超过 200、超过 8 个重复基团的有机化合物。总的来说,聚合物可分为天然聚合物、天然改性聚合物和合成聚合物三种:

- (1) 天然聚合物:主要有淀粉、生物聚合物、瓜尔胶(Guar gel)等。
- (2) 天然改性聚合物:主要有纤维素、羟乙基纤维素(HEC)、羧甲基淀粉(CMS)等。
- (3) 合成聚合物:主要有四类:

①聚丙烯酸盐类：由石油原料制成，和天然聚合物相比，其内部结构较简单，通常为阴离子聚合物。低粘聚丙烯酸盐聚合物（相对分子质量 <1000 ）可作为稀释剂和悬浮剂；中粘聚丙烯酸盐聚合物（相对分子质量为 $1000\sim100000$ ）可作为降滤失剂、絮凝剂以及页岩稳定剂；高粘聚丙烯酸盐聚合物（相对分子质量 >100000 ）可作为增粘剂和絮凝剂。

②聚丙烯酰胺：由丙烯酸和丙烯酰胺按照各种混合比例共聚而成。通常有阳离子、阴离子和非离子三种，可作为絮凝剂和页岩稳定剂。

③阳离子聚合物：由其他聚合物（如聚丙烯酸盐和聚丙烯酰胺）与阳离子基团共聚而成，可作为絮凝剂和页岩稳定剂。

④两性聚合物。

2. 水基和油基钻井液在水平井中的应用

使用油基钻井液的优点在于其高温稳定性、良好的润滑性和井壁稳定性；局限性主要表现在高成本和对环境造成的影响。一般认为盐度控制的油基钻井液在页岩稳定性方面要比水基钻井液优越得多，然而实践证明，许多欠稳定的地层可使用水基钻井液。用于改善水基钻井液页岩稳定性的处理剂包括：（1） K^+ 、 NH_4^+ 和 Ca^{2+} 等无机阳离子；（2）MMH 和 MMS（混合金属硅酸盐）；（3）阳离子聚合物；（4）聚合物包被剂，如 PHPA 和 PVA（聚乙烯醇）等；（5）聚合醇，如聚甘油酯、聚乙二醇、葡萄糖甙等。无机阳离子与聚合物的共同作用，可有效抑制页岩的水化，目前用得最多的聚合物是 PHPA 和 PVA。聚合醇也有较强的抑制粘土和页岩水化膨胀的作用，对其抑制机理目前正在进行研究。

油基钻井液在提高页岩稳定性方面的主要机理是，钻井液与页岩之间会形成一种渗透压，从而阻止水相进入页岩地层。而水基钻井液只能延缓页岩的水化，不能完全阻止它。

Chambers 等人报道了在西非近海地区使用油基钻井液砾石充填水平井的情况。过去该地区在上部地层使用油基钻井液，而在整个水平段使用细目 $CaCl_2$ 聚合物水基钻井液。这主要是为了满足砾石充填完井的需要，因为砾石充填液也是水基的。但是，为了在砾石充填之后清除泥饼造成的损害，需在整个水平段实施酸化，这无疑增加了完井的费用和施工的难度。而现在经过改进，在水平段也使用油基钻井液，结果表明，只需很小的返排压力便可清除油基钻井液形成的泥饼，不必酸化即可获得很高的产能。对比数据表明，钻井和完井总成本节约了近 30%，采油指数是使用水基钻井液时的 2~3 倍。由此看来，使用油基钻井液只会增加钻井液的配制成本，但从总的效益来看是合算的，特别对该类砾石充填完成的水平井更是如此。

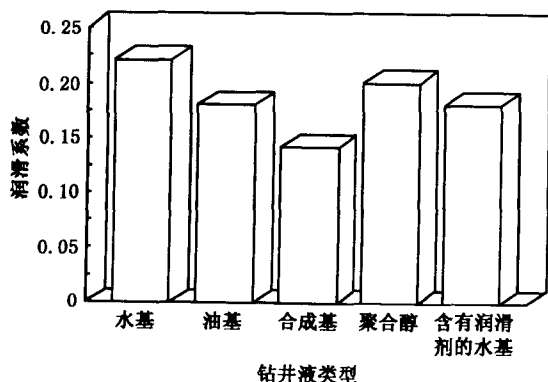


图 1-1 各种类型钻井液的润滑性比较

3. 钻井液的润滑性

在水基钻井液中，有多种处理剂用于降低钻具与井壁或套管之间的摩阻。这些处理剂包括改性的植物油和精制的多元醇等。这些处理剂可应用于任何水基钻井液中。为了便于比较，图 1-1 给出了水基、油基、合成基、聚合醇钻井液以及含有润滑剂的水基钻井液的润滑系数。

含有两个或三个羟基的聚合醇是理想的润滑剂，它们可称为甘油酯、聚甘油酯、多元醇或聚合醇。这些产品可与水混

溶。含有较高浓度聚合醇的钻井液在润滑性方面类似于油基钻井液，然而它们也会在一定程度上改变油藏岩石的润湿性，引起水锁。

4. 钻头泥包

油基钻井液的油润湿特性使其在钻具的金属部件上形成一个保护膜。这种保护膜可在最大程度上减弱页岩地层与钻具之间的结合力，使钻头发生泥包的可能性尽可能减少。

水基钻井液也可以通过在金属部件上形成一种亲油的膜，来防止钻头泥包的现象发生。聚合醇类处理剂就具有这种保护作用，有效浓度为 5%~30%（体积百分比）。当然，其有效性还取决于聚合醇的纯度和相对分子质量以及聚合醇的类型。

5. 井眼净化

与直井相比，大斜度井眼的最大问题是如何提高钻井液携带岩屑的能力。对于水平井，岩屑床的形成将阻碍钻井、完井作业的进行。

一般认为，一旦井斜大于 60°，宜用紊流清洗井。油基钻井液比水基钻井液更容易转化为紊流。在许多情况下，循环条件的限制使钻井液几乎不可能转化为紊流。因此，只能通过提粘来改善携岩能力。与油基钻井液相比，水基钻井液一般更容易迅速增加低剪切速率下的粘度和切力。图 1-2 给出了 MMH 水基钻井液的表现粘度随剪切速率的变化情况。该钻井液在低剪切速率下的粘度要比油基钻井液高得多。

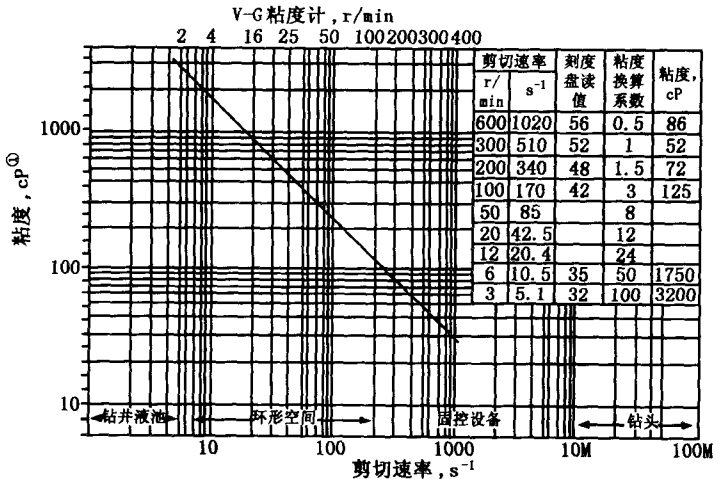


图 1-2 MMH 水基钻井液的表现粘度随剪切速率的变化

6. 增粘剂

用于增加水基钻井液低剪切速率下的粘度和静切力的处理剂有：膨润土、黄原胶（生物聚合物）、PHPA 和 MMH（或 MMS）。膨润土是最有效和廉价的粘度和滤失控制剂，但其加量不能过大，否则会影响钻速并对储层造成损害。黄原胶是一种增加钻井液低剪切速率下粘度的流型改进剂，要确保水平井有良好的携岩能力，必须保持黄原胶的浓度在临界浓度以上。通常其临界浓度为 1.25~1.5lb^②/bbl^③。

① 1cP = 10⁻³Pa·s。

② 1 lb = 0.454kg。

③ 1 bbl = 1.590 × 10²L。

MMH (或 MMS) 是带有较多正电荷的处理剂。它可通过静电力与膨润土形成一种独特的凝胶结构。这种结构能使流体携带着所有固相颗粒一起运移, 因而有非常理想的传输和悬浮特性。对其作用机理尚需开展进一步研究。其一般加量为 0.5~1 lb/bbl, 同时应含有 8~12 lb/bbl 的膨润土。

7. 高温稳定性

目前还没有一种水基钻井液能像油基钻井液那样, 在高于 400°F^① (204℃) 的温度下保持性能稳定。研制抗高温水基钻井液的难点之一是膨润土会受到高温的影响, 表现为经常出现高温胶凝, 在极高温度下又变为惰性。

已研制出几种合成的聚合物用于抗高温水基钻井液, 其中, 降粘剂有马来酸酐—苯乙烯磺酸盐共聚物、马来酸酐—磺化乙烯基甲苯共聚物; 降滤失剂有 AMPS—二甲基丙烯酰胺共聚物、AMPS—乙烯基—2—吡咯烷酮共聚物等。

8. 用水基钻井液代替油基钻井液

目前, 在钻大斜度定向井和水平井方面, 有可能接近于油基钻井液性能的水基钻井液有: 聚合物钻井液、盐水 (聚合物) 钻井液和阳离子型钻井液。

1) 聚合物钻井液

目前已有若干种聚合物钻井液用于钻水平井。只要不钻遇极不稳定的页岩地层并且井眼净化良好, 这些体系都是可用的, 并且配制成本均不高。用于钻水平井的聚合物钻井液主要有: (1) PAC 体系, 即聚阴离子纤维素钻井液, 主要处理剂为 Drispac。这种体系能在一定程度上对页岩起到吸附、包被作用, 可改善对页岩水化的抑制性, 还能提供适合的环空粘度, 从而有利于井眼净化。(2) 聚丙烯酸盐钻井液。1989 年, 该体系成功地应用于钻水平井, 取得了很好的效果。(3) PHPA (腐殖酸) 钻井液。1991 年, 在墨西哥湾地区, 该体系曾用于钻较浅的大位移井。高浓度的 PHPA (约 2 lb/bbl) 用于包被页岩, 以改善携岩能力和钻井液的润滑性。由于经常钻遇大段泥页岩地层, 故适量的腐殖酸类处理剂应同时使用, 以控制钻井液的静切力。

2) 盐水 (聚合物) 钻井液

在钻水平井时, 如果存在容易引起井壁严重失稳的地层, 聚合物常与能提供阳离子的无机盐一起使用, 以稳定地层。常用的体系有: (1) PHPA (K⁺)。这是一种最常用的能代替油基钻井液使用的水基防塌钻井液。优点在于能有效地改善页岩稳定性, 并有良好的携岩能力。但也有些缺点, 如容易受到固相污染, 且抗温性较差。各种润滑剂均可在该体系中使用。该体系在加重后, 可适量加入腐殖酸类产品。(2) 黄原胶 (K⁺)。由于黄原胶在包被页岩方面不如 PHPA 有效, 因而只能在不存在严重页岩问题的水平井中使用。优点是能提供极佳的低剪切速率下的粘度, 因而具有十分理想的携带和悬浮岩屑的能力。应注意黄原胶的抗温能力有限。与 PHPA 体系一样, 一般需加入适量润滑剂。(3) 细目盐粒体系。曾使用该体系钻成了几口水平井。该体系以细目 NaCl 盐粒作为暂堵剂, 使用聚合物胶液来提供悬浮和携岩能力。显然, 这是一种饱和盐水体系, 不宜应用于低密度的情况。由于盐粒容易溶解, 因而是一种保护储层的钻井液。

3) 阳离子型钻井液

① $1^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}^{\circ}\text{C} + 32$ 。

目前尚未见到阳离子型钻井液的定义。作者与一些钻井液专家讨论后,根据其广义特征给出了如下定义:凡是阳离子化学特性占据优势,与阴离子处理剂作用后不明显改变其阳离子基本特性的体系,均可称为阳离子型钻井液。阳离子型钻井液对页岩或粘土水化具有很强的抑制作用,但最普遍的难题是滤失量控制。这类钻井液的常用体系有:(1)MMH钻井液。特点是具有独特的凝胶结构。(2)阳离子聚合物钻井液。目前已有几种体系在进行试验研究,在许多方面被认为具有油基钻井液的性能,但抗温性不如油基钻井液。

总之,目前已有许多类型的水基钻井液用于钻水平井和大位移井,其性能设计和选用类型取决于油气井的作业参数和地层情况。一般情况下,以下因素是选择水基钻井液类型时应考虑的:(1)由于目前使用的润滑剂能降低摩擦系数,所以润滑性不是使用水基钻井液钻水平井的主要问题;(2)在使用水基钻井液钻水平井过程中,页岩稳定性、钻头泥包的消除和井眼净化问题都是可以得到解决的;(3)当温度超过400°F(204℃)时,水基钻井液不如油基钻井液稳定。因此,相对于油基钻井液来说,目前水基钻井液的主要问题是抗高温。研制出抗400°F(204℃)以上高温的水基钻井液是今后的努力方向。

(二) 适用于钻水平井的新型钻井液体系

1. “微泡”型钻井液

美国 Acti Systems 公司近年来研制了一种全新的、在近平衡水平钻井中使用的“微泡”钻井液,又称为“Aphrons”钻井液。在没有充足的空气或注入气体的条件下,该钻井液可产生一种有多层粘膜包裹的“Aphrons”所组成的“微泡”,即非聚集、可循环使用的均匀刚性气核体系。它在使用时,不仅可以实现钻井液密度的还原,还能阻止或延缓钻井液进入地层,建立起一个真正的非侵入的、欠平衡的环境,是钻定向井、水平井和大位移井的理想钻井液。

这种称为“Aphrons”的微泡体被用于无注入空气或气体的钻井液体系中。在此条件下,Aphrons 作为独立的一相与一种被多层液体包裹的气体或空气一同存在。该液体膜是保持这种微泡强度的关键,它可使 Aphrons 作为一稳定的钻井液密度还原机制而起作用。通过使用一种表面活性剂产生表面张力,以便在微泡形成时能包裹 Aphrons,从而建立起多层泡沫墙并产生界面张力,以便把微气泡结合到能产生井下桥堵的微泡网中。

为了取得最佳的使用效果,这种 Aphrons 必须在钻井液中十分稳定,其中最有效的做法是使用高屈服应力和剪切稀释性的聚合物。这种类型的聚合物能有效增加膜壁的强度,增强了微泡膜的强度,从而达到良好的稳定效果。

据报道,黄原胶生物聚合物是稳定钻井液中微泡膜最有效的物质。这种低剪切速率的增粘剂过去常被用于清洁井眼、携带岩屑悬浮物和流体侵入控制以及保护微气泡稳定性等方面。

微气泡具有独特的结构和尺寸,典型的微气泡直径在10~100μm之间,这使得它们即便是在采用固相控制的过程中仍能被循环使用。大多数微气泡即使是用细目筛网或流线型清洁器仍不能轻易被清除,同时由于它们彼此之间较为分散,因此,即便是在水力涡流器或高速离心的条件下也照样能保持原状。微气泡不受井下工具(如MWD)的使用影响,受干扰程度较强,因此该体系在定向钻井和水平钻井中具有十分理想的效果。

为了产生均匀的微气泡,必须有一个适宜尺寸的气核及产生均匀气泡的条件。当钻井流体通过钻头水眼时,在水动力条件下,由于紊流和压力降的作用将产生微气泡。由于表面活

性剂的包裹，这些稳定的微气泡能有效降低钻井液的密度并且在地层裂缝中产生井下桥堵，从而提高了低剪切速率增粘剂的效率。

该钻井液体系具有独特的滤失机理，随滤失作用附着在井壁，而当水力压力释放后，由于气泡可以消失，因此大大降低了清除泥饼的工作。虽然具有理想的效果，但在实际应用过程中，必须注意防腐、固控以及微生物降解问题。

目前该钻井完井液体系在美国得克萨斯州的 Fusselman 油田进行了几口井的试验，均表现出了良好的流变性能和保护储层的效果。

2. 聚合物水平井钻井液

针对水平井在井眼净化、悬浮固相、井眼稳定、润滑性以及保护产能等方面的问题，国外在应用于水平井的聚合物钻井液体系的选择上也进行了大量研究。使用丙烯酸类聚合物或者用淀粉的衍生物、生物聚合物以及聚环氧乙烷，可以通过各种配方配制出不同类型的聚合物钻井液体系。每种配方都有各自的优点，其特性主要取决于聚合物的化学结构。通过一些具体的配方，目前已经研制出了具有很强堵塞能力、流变特性和井壁稳定作用的聚合物钻井液体系、聚合物盐水体系、低粘土含量的聚合物钻井液体系以及钴盐胶质钻井液体系等。

例如在俄罗斯 Bashkortostan 油田，该地区使用了两种类型的聚合物钻井液体系：一种为无分散相的高粘度胶质聚合物钻井液；另一种为用聚合物盐（交联聚合物）作为分散剂的聚合物钻井液。这两种钻井液分别称为聚合物盐水体系以及聚合物分散剂体系。两种类型的钻井液基液中都含有水溶性的聚合物增粘剂，即聚丙烯酰胺（PPA）和羧甲基纤维素（CMC）。聚合物钻井液的组成见表 1-1。

从现场试验结果中可以看出，该聚合物钻井液体系具有良好的流变性和滤失性，有利于井壁稳定和井眼清洁，大大提高了机械钻速；同时也能有效地减少地层损害，保护油气层。

表 1-1 聚合物钻井液的组成

钻井液成分	具体类型	含量, %
聚合物增粘剂	聚丙烯酰胺或羧甲基纤维素	0.2~2.5
降滤失剂	铝盐及其他三价金属盐	0.03~0.10
碱性调节剂	碱金属的氢氧化物	0.1~0.5
加重剂	钠盐、钾盐、钙盐及其他金属盐	1.8~4.0
水	清水或矿化水	—

3. 混合金属层状氢氧化物钻井液

混合金属层状氢氧化物钻井液又称为正电胶（MMH）钻井完井液。该钻井完井液体系的特征是配方中含有混合金属层状氢氧化物 MMH，它具有二维层状粘土矿物的结构特征，是一种无序的二维晶体（干态）。MMH 同时具有铝二八面体和铝三八面体，其正电荷主要来源于氢氧铝三八面体中未平衡的正电荷。由于其很强的携岩能力和抑制性以及储层的保护作用，目前这种钻井液体系已成为钻各类水平井的重要手段。

MMH 钻井液是一种新型的钻井液体系。由于该体系的主处理剂 MMH 带正电荷，在体系中能和粘土相互作用而形成正电胶（粘土胶粒）复合体，从而使得整个体系带正电。一方面，由于正电胶粘土复合体具有较强的束缚自由水的能力，体系表现出快速凝胶的结构特征。而这种复合体是以水作为连接纽带，所以强度不高，稍经扰动，即能解体。另一方面，

MMH 粘土矿物具有很好的抑制性，其抑制作用可比 KCl 强十倍。该体系首次由美国德士古公司 1990 年使用钻成一口水平井，而现在全世界使用 MMH 正电胶钻井完井液体体系钻成的水平井已有数千口，均取得了很好的效果。

这种钻井完井液的优点是应用范围广，具有抑制地层造浆和防止井壁坍塌的能力，提高机械钻速明显，携岩能力强，保护油气层的效果好。缺点是滤失量较大，强造浆地层中使用增稠严重。

4. 低含盐量聚乙二醇水基钻井液

美国贝克休斯公司近年来推出了一种含示温剂或 MAME（温度激活钻井液乳化）聚乙二醇的新型钻井完井液体体系。室内实验结果支持了这种钻井液稳定页岩的新机理。现场试验证明，示温剂或 MAME 聚乙二醇水基钻井液是代替逆乳化和高电解质体系的经济有效产品。

目前，石油工业界使用的聚乙二醇是聚丙烯乙二醇或诸如丁醇等聚乙氧基短链醇和丙氧基短链醇的齐聚物。这些聚乙二醇在低温下与水混溶，加热是由于水相中的聚乙二醇变为部分不溶解，所以把分离的温度定义为浊点温度。一旦温度下降到浊点温度以下，由于这些分离相可重新溶解，所以这种现象是可逆的。水平井中页岩的井壁稳定是一个复杂的岩石力学和物理化学问题，很多因素都可能造成页岩失稳，其中水力侵入和压力渗透都可能造成严重的井壁失稳。有效地减少水力侵入和压力渗透可使用下列机理：

(1) 增加滤液粘度。达西定律指出，流体的流速与滤液的粘度成反比，滤液粘度的增加将降低流体的侵入速度，因此，可以延长发生页岩失稳的时间量程。

(2) 通过某些方法堵塞页岩孔喉，降低页岩的渗透率，借以限制流体的压力渗透。

(3) 通过页岩孔隙水向井眼中渗透回流来平衡钻井液滤液的侵入。

由于聚乙二醇在页岩的孔隙空间中发生相分离，因此可以有效地稳定页岩。当然，这里我们需要控制聚乙二醇的相对分子质量，同时还必须将浊点温度调整到与井下循环温度一致，以便充分利用井眼与井底之间的温度梯度。

低含盐量聚乙二醇钻井液体体系在印尼和泰国等地区均进行了现场应用。应用结果表明，该钻井液体体系具有良好的流变性和滤失性，能有效地稳定水平井段的页岩，且具有良好的润滑性能。

(三) 泡沫钻井液与常规钻井液井眼清洁能力的比较

自 20 世纪 80 年代井眼形状列入考虑之列以来，定向井、水平井日益普遍。然而，在钻井过程中，井眼清洁问题仍然是面临的最大挑战。井眼不清洁是造成钻井高成本的主要原因之一，并经常引起卡钻和井漏，产生高扭矩，使固井质量变差。最好的解决方法是提高环空中钻井液的流速，降低环空中的钻屑含量。实验研究表明，如果流速足够高，任何类型的井眼尺寸和井斜角都可将钻屑携带至地面，而实际上这是不可能的。由于受各种钻井条件的限制，环空流体的流速增加是有限的。

目前，泡沫钻井流体的使用日益广泛，重要原因之一是由于其携岩能力强，对钻屑的处理容量大，并可对漏失地层进行有效的封堵。早在 1950 年前后，泡沫就被用作钻井流体，但当时未引起足够的重视。

对泡沫携岩性能的研究尚不多见，尤其对水平井、斜井中泡沫携岩的研究更少。至今尚未将泡沫的携岩能力与常规钻井液进行定量比较，并形成划分井眼清洁能力的标准。

Saintpere 等人应用流体力学原理,对泡沫钻井流体与常规钻井液进行了井眼清洁情况的综合分析和比较,并建立了一种简单的实验装置来研究各种钻井液的井眼清洁性能。实验表明,泡沫的性能类似于剪切稀释溶液,并遵循 Herschel - Bulkley 流变方程。由于泡沫钻井流体的流变参数与泡沫质量有关,因此使用恒容程序及比容膨胀率(泡沫比容与液体比容之比)可绘制出总的流变曲线。

同时还研究了 Herschel - Bulkley 值 H_b (屈服应力与粘滞应力之比)、比容膨胀率 ϵ 以及流动特性时间 T^* (流体中颗粒的流动时间与滞留时间之比)等无因次参数对井眼清洁效率的影响,并评价了井斜角、颗粒尺寸及浓度的影响。

一方面,对于剪切稀释性流体,在动切力、流动特性时间相同的情况下, H_b 值越高,层流时的携岩效果越好。同样地,如果流动特性时间 T^* 增加,也会提高携岩效果。

另一方面,在井斜角高的情况下,高 H_b 值的泡沫钻井流体比常规钻井液的携岩效果要好。在这些斜井中,经常会观察到有“颗粒死角”存在,表明使用常规钻井液时井眼清洁效果较差。同时,还发现泡沫流体的井眼清洁效果与比容膨胀率 ϵ 有很大关系。由于受井眼中初始颗粒尺寸及含量的影响,当井斜角为 $40^\circ \sim 60^\circ$ 时井眼清洁效果最差。

总之, H_b 与流动特性时间是决定携岩能力的主要因素。将这些数据推及至大位移井,最终可得到清除钻屑所需的最短循环时间。

研究表明,Herschel - Bulkley 值 H_b 是评价井眼清洁效率的一个有用参数,因为它既考虑了钻井液的流变性,又考虑了流速剖面。在设计泡沫钻井流体时,使用该参数比单纯使用动切力更为合理。动切力只能代表很低剪切速率下的情况,而不能很好地表示井眼清洁效率。

(四) 合成基钻井液新技术在高温高压水平井钻井完井中的应用

Swanson 等人详细介绍了合成基钻井液在位于北海的英国 Marnock 油田的应用情况。该油田储层位于垂直深度 11500ft^① (3500m) 处,油藏温度为 310°F (154℃),压力为 9100lb/in^② (62.7MPa),静水压力剖面不断变化,不仅为水平井钻井施工增加了难度,并且卡钻事故也不断发生。

由于压力较高,要求钻井液密度不小于 1.88g/cm³,因此需要严格控制当量循环密度,既要避免气侵,又要防止钻井液漏失。钻井液体系采用合成基钻井液。尽管合成基钻井液有许多优点,但对于该油田复杂地层,特别是高密度的情况下,仍有许多技术问题需要解决。遇到的主要问题有气侵、压差卡钻及储层损害等,原因主要包括静水压力变化、重晶石沉降、井眼清洁程度不够、当量循环密度过高、钻井液滤失量过大及泥饼太厚等。以上情况表明,在钻井液流变性、密度及滤失性控制方面均有一定难度。

为了避免压差卡钻,应对钻井液性能进行优化,包括循环和静止时的钻井液密度确定,中等渗透率地层的钻井液滤失量及其与泥饼的关系,低密度固相体积百分数的确定,以及泥饼粘附系数及其厚度、强度、润滑性等其他参数的评价。在已钻井最佳性能的基础上确定性能范围,然后根据现场实际情况进行修正。

高温高压油藏条件限制了储层免受钻井液伤害的选择。由于需要高密度的钻井液来控制

① 1ft = 0.3048m。

② 1in = 0.0254m。

储层压力，而水平井段的延伸要求钻井液的摩阻系数要小，因此在钻井液配方设计方面受到诸多限制。储层相对较高的渗透率和防砂筛管的存在等因素也增加了储层损害的可能性。这种情况下，必须通过钻井液配方优化设计，尽可能减轻对储层可能造成的损害。在钻井过程中，应不断对钻井液进行测试和性能控制，特别是对 HTHP 滤失量进行有效控制，使储层能得到有效的保护。

在现场试验过程中，还采用了钻井液压差卡钻趋势测量技术，以及利用 X 射线荧光分析对低密度和高密度固相含量进行监控等技术。一般情况下，采用钻井液的常规性能如静切力、滤失量及低密度固相含量等指标来确定压差卡钻的可能性，而很少注意泥饼本身的特性。该研究使用泥饼粘附系数测定仪对泥饼的厚度、强度和润滑性等进行了系统的评价。传统的重晶石沉降趋势测定方法是监测“泵入”和“返出”的钻井液密度，实际上可以采用包括非放射性密度仪（NRD）在内的钻井液性能实时监控设备，并使用孔隙堵塞仪来检测钻井液的滤失量和泥饼的厚度，其结构和使用方法均类似于 HTHP 滤失量测定仪。

为了确保高温高压油井，特别是在其水平井段和滤砂筛管完井过程中的作业顺利完成，事先进行周密的计划和准备是非常必要的。其中非常重要的一部分工作就是监控钻井液的性能，包括识别和划分可能存在的问题以尽可能避免。本文所提到的各种测量新方法有助于避免各种可能出现的问题，如重晶石沉降及可能造成的井眼失控和卡钻等事故。

（五）根据地层特点选择水平井钻井液的类型

Hillier 报道了英国北海油田如何根据地层特点选择水平井钻井液的一些基本准则。首先，由于储层保护和井眼清洁对水平井来说非常重要，所以这两方面是必须着重考虑的因素。其次，还应考虑页岩井壁的稳定性和所形成泥饼的润滑性。目前，甲酸盐类钻井液已在北海油田的水平井钻探中被普遍采用，原因主要是甲酸盐钻井液容易实现无固相，在不加入重晶石的情况下可将钻井液密度调整至 $2.2\text{g}/\text{cm}^3$ ，因此对保护储层十分有利。在某些水平井使用聚合醇类钻井液体系，是因为它对页岩水化有很强的抑制性以及具有很好的润滑性，并且在取心时有利于保存储层流体，使岩心更具有代表性。在使用聚合物钻井液时，一般均加入暂堵剂细目 CaCO_3 ，其粒径必须与储层相匹配。研究表明，合理使用细目 CaCO_3 可对渗透率范围从几个 $\text{mD}^{\text{①}}$ 至 10D 以上的储层孔喉入口处进行封堵，与聚合物一起形成致密的泥饼。从储层保护的角度考虑，对所形成泥饼的要求是要堵得住，并容易返排解堵，甚至于不必通过溶解的方法，而是通过油气开采时的返排压力而解堵。根据储层的地质情况，选用与储层配伍的处理剂，也是暂堵型聚合物水平井钻井液必须考虑的因素。

（六）采用裸眼完井方式的水平井钻井液技术

目前，采用水平井钻井方式从未固结砂岩储层中取得更经济有效的产量已经得到普遍的认可了。因为这些井采用了裸眼完井，所以成功与否常常取决于所采用的钻井完井液体系性能的好坏。在钻开油气层前，首先应该确定钻井完井液具有良好的润滑性、抑制性、流变性和井眼稳定性。同时，钻井完井液体系应该在井壁处形成有效的泥饼，以控制滤失来保护产层。

对三种打开油层钻井液体系进行了室内试验，以便确定每种体系的优缺点。研究的目的

① $1\text{D}=0.987\mu\text{m}^2$ 。

不是逐一地推荐钻井液，而是为特殊场合选择最佳钻井液提供必要的数据库。

目前，国外对于裸眼完成水平井所选用的钻井完井液体系主要有以下四种水基打开油层钻井液体系：

(1) 细目盐粒（聚合物）钻井液：它是用 NaCl 作为主要的桥堵颗粒。钻井完井液体系中的饱和盐水保持颗粒盐不溶解，然后用改型淀粉、黄原胶来控制滤失和粘度。这种钻井液是一种无损害的、具有良好润滑性能和良好悬浮性能的剪切稀释性流体。NaCl 的立方结构使其致密堆积，因而形成了坚韧、薄而有渗透性的泥饼。在用欠饱和盐水之前，用酸浸可以清除泥饼。

(2) MMH (CaCO_3) 钻井液：这种钻井液是用混合金属氢氧化物配制的。它具有能提供优良性能和悬浮固相的触变性，具有对储层损害程度低、抑制性好、润滑性好和低毒等特点。普通 MMH (CaCO_3) 钻井液的配方是：10 lb/bbl 预水化膨润土、1 lb/bbl MMH、4 lb/bbl 钙型多聚糖（控制滤失量）、 CaCO_3 桥堵剂和加重材料。

(3) 细目碳酸钙（聚合物）钻井液：细目碳酸钙体系是一种聚合物钻井完井液体系。该钻井液使用了具有广泛颗粒分布的纯碳酸钙去桥堵只有几个 mD 到超过 10D 的岩石孔隙喉道。通过加入聚合物降滤失剂来达到低的滤失速率。这种聚合物能产生一种薄的、抗冲蚀和润滑性好的泥饼。体系中用生物聚合物增粘，用钾盐来改善钻井液的一致性和泥饼的分散性。钻井液具有剪切吸湿性和较低初触失水。

(4) 混合金属硅酸盐体系：这种钻井完井液体系利用了混合金属硅酸盐（硅酸钙铝）与预水化分散膨润土作用形成一种复合物，以产生一种具有不同寻常特性的钻井液。这种钻井完井液的剪切稀释性使其流变曲线比较平缓，具有良好的携带岩屑能力。混合金属硅酸盐体系的流变性与正电胶（MMH）相似。混合金属硅酸盐钻井液允许使用由淀粉衍生物的降滤失聚合物和高密度的颗粒，诸如颗粒碳酸钙或重晶石等。另外，其高粘性也降低了钻井液向孔隙喉道和裂缝滤失的速度。

混合金属硅酸盐在应用过程中也具有局限性。这种钻井完井液与高矿化度盐水具有不相容性。可以使用海水，但水相不能达到很高的密度。

二、大位移井钻井液技术新进展

大位移井（Extended Reach Drilling, ERD）的含义是，油井的井底水平位移大于或等于垂直深度的两倍，一般可称为大位移水平井。与普通水平井相比，它能钻穿更长的油层井段，可以更大范围地探明和控制含油面积，大幅度地提高单井产量。

大位移井的发展主要基于以下两方面的原因：(1) 大位移井主要用于优化海上和浅海油田的开发，可减少所需平台的大小、数量以及油井数量，增加储层裸露面积，从而增加油井产量和采收率；(2) 采用大位移井进行开发能节约油田开发综合成本。

但是，由于钻大位移井的过程中，钻遇油层长时间地裸露，与直井相比，大位移井钻井作业增加了许多技术难题，如大斜度井段中，钻柱与井壁接触面积增大，摩阻增加；井眼清洗不力；井壁不稳定导致缩径、坍塌等复杂情况，增加了钻进和起下钻过程中的扭矩与摩阻，容易导致卡钻事故的发生等。

（一）国外钻大位移井使用的主要钻井液体系

根据影响大位移井的主要因素，目前国外大位移钻井资料表明，世界上大位移井钻井作

业中多数采用的是油基钻井液和合成基钻井液。这主要与其良好的润滑和防塌性能有关。表 1-2 列出了近年来世界上大位移井钻井作业中的钻井和钻井液体系情况。可以看出, 这些井基本上都是使用油基钻井液和合成基钻井液钻成的。

1. 油基钻井液

油基钻井液是指以油作为连续相的钻井液。早在 20 世纪 20 年代, 人们就曾使用原油作为钻井液, 以避免和减少钻井中各种复杂情况的发生。但在实践中发现, 使用原油有以下缺点: 切力小, 难以悬浮重晶石, 滤失量大, 以及原油中的易挥发组分易引起火灾等。于是后来逐渐发展成为以柴油为连续相的两种油基钻井液——全油基钻井液和油包水乳化钻井液。

表 1-2 近年来国外大位移井基本情况

区 域	井 号	测 深 m	垂 深 m	水平位移 m	年 份	钻井液体系
英国陆上	F18	4449	1600	3855	1986	油 基
	F21	6180	1600	5420	1994	油 基
	M3	7449	1594	6818	1995	油 基
	LM-05SP	8700	1605	8035	1995	油 基
	M11	10657	1605	10114	1998	油 基
英国北海	A13	6021	—	4763	1988	油 基
	ExcalibueE5	—	2660	6900		油 基
挪威北海	C3	7429	2695	5854	1991	合成基
	C2	8761	2700	7290	1993	酯 基
中 东	AlShaheen2		1060	3800	1994	油 基
北 美	A21	5090	1460	4472	1992	聚合醇
	C29	1335	293	1156	1990	海水聚合物
亚 太	XJ24-3-A14	9236	2912	8064	1997	油 基
南 美	ARA S7/1	6982	1684	6252	1996	油 基

与水基钻井液相比, 油基钻井液具有能抗高温、抗盐钙侵、有利于井壁稳定、润滑性好和对油气层损害程度较小等多种优点, 目前已经成为钻高难度的高温深井、大斜度定向井、水平井和各种复杂地层的重要手段。但是油基钻井液的配置成本比水基钻井液高得多, 使用时往往会对附近的生态环境造成严重影响, 而且与使用水基钻井液相比, 机械钻速一般较低。不过在钻特殊井时, 考虑到它的稳定性, 油基钻井液(一般指油包水乳化钻井液)仍是一个比较理想的选择。

Helder 油田曾使用油基钻井液(油水比为 8:2)成功地钻探了几口大位移井, 由于油基钻井液自身的特点, 因此钻井液具有良好的井眼稳定和清洁性能以及良好的润滑性, 这些因素可明显地减少卡钻事故。为减少产层损害和提高机械钻速, 钻井液密度保持在 $1.08 \sim 1.14 \text{g/cm}^3$ 之间。泵入钻井液时采用大排量以维持紊流状态, 从而优化井眼清洁状况, 有助于岩屑的运移。由于油基钻井液降低了钻头泥包的趋势, 控制了页岩(粘土)的水化, 从而提高 PDC 钻头的效率和钻速。

油基钻井液体系虽然具有流变性好、钻速高、抗高温高压、密度范围广的优点, 但是由于该体系成本高且污染环境, 因此正逐渐被一种仿油基的合成基钻井液体系所代替。

2. 合成基钻井液

合成基钻井液是作为油基钻井液的替代体系在 20 世纪 90 年代发展起来的, 它是以人工