

中国石油天然气集团公司钻井工程重点实验室
中国石油工程学会钻井液学组

钻井液技术文集

(2005)

孙金声 刘雨晴 主编



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

中国石油天然气集团公司钻井工程重点实验室
中国石油工程学会钻井液学组

钻井液技术文集

(2005)

孙金声 刘雨晴 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本论文集内容主要针对当今钻井液领域的前沿技术及国内油气钻井过程中所面临的油气层保护、井壁稳定等实际难题,理论与实践紧密联系,研究成果涉及新型钻井液体系及其处理剂的研制等各个方面,在一定程度上反映了我国钻井液技术的最新动态和研究水平。

本书对从事油气井钻井工程的现场技术人员、相关科研院所的研究人员具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

钻井液技术文集 2005/孙金声、刘雨晴主编.

北京:石油工业出版社,2006.12

ISBN 7-5021-5717-4

I. 钻…

II. ①孙…②刘…

III. 钻井液-技术-文集

IV. TE 254-54

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 107001 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

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

2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:21.5

字数:546 千字 印数:1-1000

ISBN 7-5021-5717-4/TE·4342

定价:80.00 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

序

为了推动我国油气钻井工程中钻井液技术的发展与进步,中国石油工程学会钻井液学组与中国石油天然气集团公司钻井工程重点实验室于2005年9月在北京密云联合举办了“钻井液完井液新技术研讨会”。参加会议的有来自国内三大石油公司和相关高等院校从事钻井液研究、开发、教学、应用、管理的专家和学者及部分油田化学助剂生产厂商代表共计180余人,参加人数为历年之最。与会人员会前准备充分,会议期间积极交流了近期所取得的新成果、新进展及新经验,并探讨了“十一五”钻井液技术主要任务及未来的发展方向。大家一致认为参加本次研讨会增长了见识、开阔了思路,会议达到了预期的效果,会议取得圆满成功。

本次会议共收到121篇投稿文章,经专家初步筛选,其中的92篇论文在会上进行了交流。由20名专家、教授组成的评委会对会上交流的论文公开、公平、公正地进行了评比,优选出38篇优秀论文。现将本次会议评选出的优秀论文及部分有代表性和有指导意义的论文结集出版。

本论文集的内容主要针对当今钻井液领域的前沿技术及国内油气田钻井过程中所面临的油气层保护、井壁稳定、深井重泥浆窄安全密度(压力)窗口 Δp 的钻井与钻井液技术等实际难题,理论与实践联系紧密,研究成果涉及新型钻井液体系及其处理剂的研制等各个方面,在一定程度上反映了我国钻井液技术的最新动态和研究水平。其中,深井重泥浆窄安全密度(压力)窗口 Δp 的钻井、超低渗透钻井液技术、隔离膜与半透膜水基钻井液技术、深井超深井钻井液技术、正电聚醇钻井液技术、微泡钻井液技术、空气泡沫钻井液技术、纳米技术在钻井液领域中的应用等均是近来国内外钻井液技术研究的热点新技术。从机理研究、室内性能测试、技术优化到现场应用,均取得了可喜的进展,有些技术已在现场应用中获得了良好的技术效果、经济效益与社会效益。有些技术引入了新的理念,如将纳米技术引入钻井液,或对钻井液中的一些关键处理剂利用纳米技术进行改性,这些新的理念有可能突破现有钻井液的技术“瓶颈”,有望在钻井液的抑制性、防塌、保护储层、提高钻速等方面实现新的突破。

本论文集汇集了全国钻井液完井液技术优秀人才近几年的理论与实践精华,对处置现场井下复杂情况有指导和借鉴作用,对钻井液现场处理思路拓宽有启迪意义。对国内从事钻井液技术领域的科研人员和技术人员及院校师生有一定的参考、借鉴作用。

中国工程院院士:

罗平亚 苏文海

2005年10月

目 录

2004 年国外钻井液技术新进展	赵忠举 徐同台 卢淑芹 (1)
超低渗透钻井液作用机理研究与应用	孙金声 刘雨晴 苏义脑等 (35)
新型 KCl-硅酸钠钻井液在强水化分散泥页岩钻进过程中的应用	鄢捷年 郭健康 程存志等 (44)
钻井液隔离膜理论与成膜钻井液研究	蒲晓林 雷 刚 罗兴树 (57)
钻井完井废弃物固化处理技术及其工业应用	何 纶 周凤山 刘 榆 (63)
BZ 25-1 油田(二期)钻井液体系的优选和应用	耿 铁 王 伟 魏子路等 (70)
塔里木山前构造带高密度钻井液堵漏技术	王书琪 张 斌 何 涛等 (76)
霍 003 井钻井液完井液技术	何 涛 贺文廷 王 伟等 (83)
乳液和乳化技术及其在钻井、完井液中的应用	蓝 强 苏长明 刘伟荣等 (90)
塔河油田深井超深井钻井液技术	郭才轩 王悦坚 宋明全 (102)
空气泡沫钻井液回收再利用技术	刘德胜 刘绪礼 (107)
水基钻井液配浆剂纳米化途径和表征方法	崔迎春 苏长明 李家芬等 (114)
有机氟硅共聚物(SF)抗高温钻井液及应用	秦永宏 万绪新 董春旭等 (119)
无机-有机单体聚合物钻井液体系研究与应用	杨小华 刘明华 王中华 (135)
严重漏失地层随钻堵漏技术研究应用	隋跃华 成效华 高建礼等 (142)
隔离膜水基钻井液技术研究与应用	汪世国 肖登林 张 毅等 (150)
硅酸盐钻井液对泥页岩地层井眼稳定性的影响研究	罗健生 徐绍成 王雪山等 (157)
水基半透膜钻井液技术的研究与应用	林喜斌 孙金声 苏义脑 (165)
成膜水基钻井液技术研究与应用	冯京海 李祥银 李家库等 (173)
高密度钻井液工艺技术	刘有成 王祥武 逯登智等 (181)
肯基亚克油田钻井液技术	范作奇 逯登智 林建强 (188)
吐哈油田西部盐膏层钻井液技术研究与应用	黄承建 王卫国 乔国文等 (195)
BZ25-1 深井油基钻井液技术及堵漏探讨	张 荣 胡成军 耿 铁 (225)
可循环微泡沫钻井液技术在吐哈三低油藏中的研究与应用	余丽彬 刘天奎 朱夫立 (232)
正电聚醇钻井液体系在老堡南 1 井的应用	田春雨 孔庆明 伍 勇等 (240)
塔河油田盐下探井 $\phi 311.1\text{mm}$ 井段长裸眼井壁稳定问题的探讨	赵炬肃 (248)
钻井工程固井胶结界面研究现状	杨振杰 李家芬 苏长明 (254)
钻井液用纳米乳液 SLNR 的研究应用	郭保雨 王宝田 江智君等 (262)
聚合铝防塌剂 AOP-1 在防塌钻井液中的应用研究	张和平 于培志 (269)
水平井硅基阳离子钻井液体系	敬增秀 郑 涛 孙宪军 (274)
低渗砂岩气藏水锁伤害和防治方法初探	杨呈德 王长宁 马祥林等 (279)
新型杂多糖甙生物钻井液的研究与应用	吴富生 许春田 张 洁等 (289)

NATU 钻井液技术 姚少全 李君勋 (301)

钻井液触变性评价方法的合理性探索 崔茂荣 马 勇 (305)

钻井液快速封堵油层保护技术 左凤江 贾东民 刘德庆等 (310)

塔里木油田水基废钻井液无害化技术研究 王平全 王书琪 何 涛等 (313)

石南 21 井区开发井钻井油气层保护技术研究..... 李 涛 戎克生 胡家忠 (323)

新型高钙复合盐钻井液体系的研制与应用 刘 榆 彭云涛 宋元森等 (332)

2004 年国外钻井液技术新进展

赵忠举¹ 徐同台² 卢淑芹³

- (1. 中国石油天然气集团公司经济技术研究院; 2. 中国石油天然气集团公司老干部局;
3. 中国石油冀东油田实验中心)

2004 年是钻井液技术发展较快的一年, 其主要特点是研制出了一批新型钻井液, 这些钻井液都是针对稳定井壁、防漏堵漏、井壁稳定、环境保护和防止地层伤害等; 第二个特点是新理论、新材料和新型处理剂已应用至钻井液中, 使钻井液技术又有新的发展。

1 新型钻井液

1.1 新型微泡钻井液

M-I 钻井液公司在标准微泡钻井液的基础上研制出一种新型微泡钻井液。标准的微泡钻井液使用聚合物来使钻井液产生独特的流变性和提高微泡的韧性, 而新型微泡钻井液体系是使用粘土和聚合物来使钻井液达到理想的流变性和稳定微泡。

表 1 和表 2 给出了普通微泡钻井液的组分和新型微泡钻井液的组分。这两种钻井液都含有增粘剂、pH 控制剂、微泡发生剂、微泡稳定剂和漏失控制剂。两者之间的主要差别是增粘剂的性能不同。

表 1 普通微泡钻井液体系的配方

组 分	作 用	含 量
淡水/盐水	连续相	0.97bbl ^①
纯碱	硬度缓冲剂	3 lb/bbl
生物聚合物	增粘	5 lb/bbl
聚合物	失水控制剂和热稳定剂	5 lb/bbl
碱度控制剂	控制 pH 值	0.5 lb/bbl
表面活性剂	微泡发泡剂	2 lb/bbl
杀菌剂	杀菌	0.05gal/bbl
聚合物/表面活性剂	微泡稳定剂	1 lb/bbl
聚合物	钻井液调节剂	1 lb/bbl
低聚物	消泡	根据需求

① 1 桶 (bbl) = 0.159 立方米 (m³)。

表 2 新型微泡钻井液体系的配方

组 分	作 用	含 量
淡水/盐水	连续相	0. 97 bbl
纯碱	硬度缓冲剂	0. 25 lb/bbl
苛性钠	碱度控制剂	1. 5 lb/bbl
粘土/聚合物	增粘	25 lb/bbl
聚合物	失水控制剂和热稳定剂	2 lb/bbl
表面活性剂	微泡发泡剂	0. 5 lb/bbl
杀菌剂	杀菌	0. 05gal/bbl
聚合物/表面活性剂	微泡稳定剂	1 lb/bbl
聚合物	钻井液调节剂	0. 2 lb/bbl
低聚物	消泡	根据需求

通过测量新型微泡钻井液在 70°F 下热滚后的性能,标准微泡钻井液与新型微泡钻井液的流变性只有微小的差别。新型微泡钻井液的流变性比标准微泡钻井液略低一些,但其稳定性和滤失量却是标准微泡钻井液的两倍。在盐水体系中其差别就更大了,新型微泡钻井液剪切流变性比标准微泡钻井液低得多。

在三轴岩心失水测试仪上进行了失水测试,30min 后标准微泡钻井液和新型微泡钻井液的滤失量分别为 43mL 和 20mL。在配制过程中,施加的高剪切速率使空气进入微泡钻井液并增加了粘土的分散。

用动态恢复渗透率测试仪进行了岩心的恢复渗透率测试。使用结果表明,标准微泡钻井液和新型微泡钻井液的岩心恢复渗透率分别为 80% 和 85%,因此认为这两种微泡钻井液伤害地层的可能性是很低的。

海水配制的新型微泡钻井液最近在墨西哥湾下井,其流变性变化比其他聚合物钻井液小得多,新型微泡钻井液具有很好的井眼清洁能力,而且其当量循环密度较低。

1.2 多功能钻井液

BP 勘探公司研制出一种多功能钻井液,在钻进时能有效地增加地层的抗压裂强度。这种钻井液既可以用于页岩地层,也可以用于砂岩地层。

1.2.1 理论研究

该方法实际上允许井壁上形成小的裂缝,然后用桥堵颗粒在井壁裂缝的开口处堵塞裂缝。这种桥塞必须是低渗的,而且能提供压力封隔。在井壁上或井壁附近桥堵裂缝增加了井壁周围的环形应力,这种方法叫做应力屏蔽效应。在钻进时,通过不断往钻井液中加入适量的颗粒材料,使钻井液连续产生这种作用。把这种钻井液叫做多功能钻井液。

假设地层在压力下产生径向裂缝的尺寸和地层的硬度呈函数关系,那么可列出下式

$$\Delta p = \frac{\pi}{8} \times \frac{w}{r} \times \frac{E}{(1 - \nu^2)}$$

式中 Δp ——裂缝内的过度压力(过度压力是指压力超过最低实地应力);

w ——裂缝宽度；
 r ——裂缝半径；
 E ——地层的杨氏模量；
 ν ——地层的泊松比。

上式是以压裂理论为基础的。多功能钻井液是利用桥堵颗粒堵塞裂缝的开口来控制裂缝，裂缝的过度压力被桥堵颗粒所施加的机械应力替代，所以不能直接利用上式来计算应力屏蔽效应对井眼强度的影响。

利用上式进行了敏感性分析，并观察到了一些重要的现象：

- (1) 当裂缝宽度小到 1mm，而裂缝的半径范围为 1m 时，井眼强度可增加到 1000psi^①；
- (2) 短裂缝或有支撑的长裂缝敏感性最好，如果有支撑的裂缝很长，裂缝很容易再次裂开，而且当裂缝拓宽后才能达到同样的强度；
- (3) 软岩石需要较大的裂缝宽度。

在渗透性岩石中使用桥堵颗粒效果并不好，因为钻井液可以穿过桥堵颗粒，进入岩石裂缝中从而侵入基岩，在裂缝中不能形成压力而且裂缝不能扩大。不但如此，在裂缝壁上还会形成滤饼。当裂缝初步形成时，桥塞后面的压力降会进一步产生作用，提高裂缝横截面的应力并导致桥塞后面的裂缝闭合，这就是桥塞稳定地层的方法。

如果钻井液中所含的颗粒太小，不能在裂缝口附近形成桥塞，那么裂缝将被裂缝内的滤饼密封。如果密封/桥堵缓慢，通过应力屏蔽效应会使裂缝延伸得太长。这种情况已在现场得到证实。

诸如页岩等低渗岩石，需要桥塞具有极低的渗透率以防止压力穿透进入裂缝和拓宽裂缝。使用超低滤失钻井液加固井眼已有专利技术，并在页岩段使用取得了很好的效益。使用时要认真考虑桥堵颗粒穿过页岩地层的驱动力。最初钻井液进入裂缝，桥堵颗粒在裂缝口处沉积，但需要控制穿过桥塞的压差。

1.2.2 室内和现场试验

在压裂技术实验室使用特制的设备进行了裂缝密封试验。试验时使用的是圆筒型岩心试样，利用钻井液的压力使岩心产生裂缝。试验结果指出，碳酸钙和石墨的混合物是降低钻井液侵入裂缝最好的材料之一。试验还指出，裂缝宽度是无法控制的。为测试多功能钻井液，专门设计了一套试验装置，用这套试验设备研究了岩石渗透率、钻井液类型、温度、钻井液注入压力、钻井液密度、桥塞颗粒类型、桥塞颗粒含量、桥塞颗粒的尺寸分布、钻井液滤失量和裂缝宽度等参数。通过试验研究得出下列结论：

- (1) 钻井液中应加入颗粒尺寸为 $1\mu\text{m}$ 到裂缝宽度的桥堵颗粒；
- (2) 对低密度钻井液来说，选择最佳颗粒尺寸分布的理想填充理论是有用的；
- (3) 以高颗粒含量为最佳，最低含量不应低于 $15 \times 10^{-3} \mu\text{g/g}$ ；
- (4) 在某些试验中，在高达 3000~4000psi^① 的过平衡压力下穿过地层密封了裂缝；
- (5) 钻井液密度不是桥堵成功的关键。

BP 勘探公司在 Arkoma 盆地和北海进行了现场试验。试验结果表明：应力屏蔽效应在现场应用是成功的；使用多功能钻井液可以支撑和密封井壁上形成的短裂缝；现场和室内试验结果表明在低渗岩层中使用也有显著的效果。

① 1 磅力/英寸² (psi) = 6.895 千帕 (kPa)。

1.3 高密度低固相油基钻井液

M-I 钻井液公司研制出一种新型油基钻井液，这种钻井液是利用高密度的甲酸铯盐水来达到理想的密度。

当使用密度为 2.2 g/cm^3 甲酸铯盐水来配制钻井液时，低固相钻井液体系的密度可达 1.7 g/cm^3 。M-I 钻井液公司使用密度为 2.2 g/cm^3 的甲酸铯配制了密度为 1.66 g/cm^3 低固相油基钻井液并在 Statfjord 油田进行了试验。表 3 列出了这种钻井液的配方和特性。

表 3 低固相油基钻井液的配方和特性

组 分		1.66 g/cm ³ 的低固相 油基钻井液	1.66 g/cm ³ 的 油基钻井液
基油 (L/m ³)		360	560
氯化钙盐水 (L/m ³)		—	158
甲酸铯盐水 (L/m ³)		590	—
乳化剂增粘剂 (L/m ³)		35	30
石灰 (kg/m ³)		2	15
堵漏材料 (kg/m ³)		3	—
碳酸钙 (kg/m ³)		30 (体积 1%)	—
重晶石 (kg/m ³)		—	940 (体积 22%)
在 50℃ 下的 流变性	600r/min	117	102
	300r/min	68	60
	200r/min	50	45
	100r/min	31	30
	6r/min	8	10
	3r/min	7	9
	10s 静切力 (lb/100ft ²)	7	12
	19min 静切力 (lb/100ft ²)	8	16
在 115℃ 高温 高压下漏失量	定量滤纸 (mL/30min)	—	1.6
	20μm 膜 (mL/30min)	—	3.2

低固相油基钻井液与常规油基钻井液的差别是钻井液的固相含量由 22% 降低到 1%，不使用加重材料可把高密度油基钻井液的重晶石沉降问题降低到最低程度。在 115℃ 下对这种钻井液的温度稳定性进行了为期 13d 的测试，发现试样的顶部分离出一些游离态的油，而游离油下面的试样是十分稳定的，在试验期间没发现游离态的盐水。用岩心进行了地层伤害试验。试验时，首先将岩心暴露在常规油基钻井液中，之后用低固相油基钻井液将常规钻井液替出。试验结果表明，低固相油基钻井液对地层的伤害很小。

Statoil 公司在 3 口井上进行了现场试验。钻井程序是对 3 口低产井进行了回填，之后下 9 5/8" 斜向器并铣磨开窗。用三维旋转导向系统钻到设计深度，下 7" 尾管约 100m。固井后用 6" 钻头钻开管鞋，从 7" 管鞋到设计深度使用低固相油基钻井液钻进。

尽管低固相油基钻井液的水活度很低，但没发现缩径和井眼失稳情况。据研究认为油井

页岩段的活化程度不高。对返出的钻井液要在振动筛上使用网筛测试仪进行测试,以防止钻井液中的颗粒堵塞振动筛的筛网。

使用低固相油基钻井液可以使 Statoil 公司选择最好的完井设计,使用这种钻井液可节省数天的钻机占用时间。

利用低固相油基钻井液完成的第一口井的产量为 $2150\text{m}^3/\text{d}$,产能指数为 80,而根据测井数据预测的产能指数为 77。第二口井的产量为 $4000\text{m}^3/\text{d}$,产能指数为 200,低于 300 的预测的产能指数。第三口井的产量为 840m^3 ,产能指数为 72。

使用低固相油基钻井液取得了下列效果:

- (1) 可以减轻钻井液与完井液不相容所造成的不利影响;
- (2) 减少钻井液颗粒堵塞振动筛网的可能性;
- (3) 不会发生井眼失稳问题;
- (4) 完井后油井的产能高。

1.4 “魔术”钻井液

BP 公司研制出一种线型烯烃钻井液并取得专利权,这种钻井液在环保、健康和安全方面取得了很大进展。与柴油基钻井液相比,这种钻井液具有低毒和可在土壤中降解的特性,其在陆上钻硬岩层和深井时具有较高的钻井效率。在哥伦比亚东北的 Noel 和 Wapiti 地区和加拿大的阿尔伯达地区对合成烯烃钻井液进行了两年的试验。试验结果表明,合成烯烃钻井液与柴油基钻井液的性能相似,但在同样的钻井液特性、钻井参数和同样钻头的情况下,使用线型烯烃钻井液钻页岩时的机械钻速要比使用柴油基钻井液的机械钻速高 50%。

在深井钻硬岩层时这种钻井液提高机械钻速的效果更明显。在 2000ft 以下井段,平均机械钻速可提高 84%,而在 2500ft 以下井段,其机械钻速可提高 117%。一口井的总钻井时间从 26d 降低到 17d。

BP 公司在哥伦比亚的 Wapiti 地区打了几口井,使用线型烯烃钻井液的油井在 165h 内就可钻达 2500m,而使用柴油基钻井液所打的井要 280 h 才能钻达 2500m。

这种钻井液是一种清洁和无嗅的产品,其芳香烃的含量低于 0.001%。钻井液使用的烯烃是从乙烯中提炼出来的,而柴油和矿物油钻井液使用的油类是由原油炼制的。这种钻井液给井队提供了更清洁的环境。

线型烯烃钻井液的闪点为 116°C ,而柴油基钻井液的闪点为 $66\sim 76^{\circ}\text{C}$ 。BP 公司的两种烯烃产品(异构四乙酸酯 C-14)的倾点为 $-35\sim -40^{\circ}\text{C}$,而且是低毒性的,所以特别适合在低温环境中钻井。线型烯烃钻井液的钻屑很容易处理。室内试验表明,线型烯烃钻屑在土壤中 3 个月后几乎可以完全降解(其降解率为 96%~97%)。而现场研究结果是,线型烯烃钻屑在土壤中的降解率要低于室内试验的降解率。在农场的土壤中,28 个月后的降解率为 96%,29 个月后的降解率为 99%。

然而,烯烃钻井液的价格较高,约是柴油基钻井液的 2 倍。所以只能通过缩短钻井时间和降低钻井液的维护成本来弥补这种钻井液价格过高造成的经济损失。

1.5 甲酸盐钻井液

1.5.1 甲酸盐在井底条件下的化学特性

甲酸钠、甲酸钾和甲酸铯盐水是最近开发的、可作为清洁完井液和封隔液新型盐水。然

而，关于现场应用的甲酸盐盐水的化学特性，特别是在高温条件和含 CO₂ 等酸性气体的恶劣环境下，其化学性质却几乎没有报道。

BJ 服务公司为了获取甲酸盐在井底条件下的化学特性进行了试验。试验时使用的是市场上购买的甲酸钠和甲酸钾，不做进一步提纯。用试剂等级的氢氧化钠和氢氧化钾调整 pH 值。根据内部标准测量了纯溶液的 pH 值。按照 NACE 的标准运输和测量金属试样。在进行腐蚀和热稳定试验之前，不要从甲酸盐中除氧，仅仅用氮气充满试验腔的上部空间。

需要 CO₂ 时，把 CO₂ 压进氮净化腔，以便把进入甲酸盐中的 CO₂ 的溶解度控制到最低。再由鼓风机进行空气循环的烘箱内进行老化试验。

试验包括标准的单一试样失重腐蚀测量，U 型管的应力腐蚀断裂、双金属腐蚀和甲酸盐的热稳定性。

BJ 服务公司直接测量了高密度盐水的 pH 值。直接测量可以避免腐蚀副产品沉淀的影响。试验结果如下：

(1) 失重腐蚀。在充氮加压的条件下，对两种不同密度和不同温度的甲酸钾的腐蚀性进行了研究。C4130 号钢和 410 号钢挂片腐蚀试验的结果见表 4。用同样的方法对 Cr22 号钢进行了测试，发现其腐蚀速率为零。

表 4 单挂片腐蚀试验的失重腐蚀

密 度 (lb/gal)①	温 度 (°F)	C4130 (mil/a)②		410 (mil/a)	
		7d	30d	7d	30d
10.5	150	0.1	0.0	0.0	0.0
13.1	150	0.5	0.5	0.0	0.0
10.5	365	5	0.3	0.0	0.0
13.1	365	4.4*	1.0*	1.7	1.7

注：HCO₂K、pH 值为 9.8、N₂ 加压至 300psi，重复试验；

* 为 3 次试验的平均值，第 4 次试验的结果是 C4310 号钢 22.8h 后为 5.2mil/a。

(2) 双金属腐蚀。双金属腐蚀的试验结果是，13.1 lb/gal 的盐水在 365°F 温度下偏离预期值，C4310 号钢试样的 30d 腐蚀速率略低于了 420 号钢，而 Cr22 号钢的腐蚀速率最低。

通过试验发现，pH 值与密度之间的函数关系的变化与金属类型和温度无关。表 5 和表 6 分别介绍了 420 号钢和 Cr22 号钢的 pH 值与时间和密度的关系。

表 5 420 号钢/C4130 号钢的双金属腐蚀 pH 值与密度的关系

密 度 (lb/gal)	温 度 (°F)	pH 值		
		初始	7d 后	30d 后
10.5	150	9.8	9.0	9.3
13.1	150	9.8	9.5	10.7
10.5	365	9.8	8.9	8.6
13.1	365	9.8	10.1	11.0

注：KHCO₂、pH 值为 9.8、N₂ 加压至 300psi，重复试验。

① 1 磅/美加仑 (lb/gal) = 119.826 千克/立方米 (kg/m³)。

② 1 密耳/年 (mil/a) = 25.4 × 10⁻⁶ 米/年 (m/a)。

表 6 Cr22/C4130 号钢的双金属腐蚀 pH 值与密度的关系

密 度 (lb/gal)	温 度 (°F)	pH 值		
		初始	7d 后	30d 后
10.5	150	9.8	9.1	9.8
13.1	150	9.8	9.2	11.1
10.5	365	9.8	9.1	9.4
13.1	365	9.8	10.5	11.5

注：KHCO₂、pH 值为 9.8、N₂加压至 300psi，重复试验。

(3) 应力腐蚀裂缝。对 Cr22、420 和 C4130 号钢制成的 U 型管在密度为 10.5 lb/gal 和 13.1 lb/gal 的甲酸钾溶液中和 150 °F 和 365°F 温度下进行了应力腐蚀裂缝试验，所有的试样均没有产生裂缝。

pH 值与密度间的函数关系与双金属试验是一样的，但是在应力条件下不明显。

令人吃惊的是，C4130 号钢试样在密度为 13.1lb/gal 甲酸盐溶液中和 365°F 下有某种程度的点蚀，还有一个试样有灰色包覆层。另外，还发现 420 号钢试样在 365°F 下和 C4130 号钢试样在 150°F 下试验后在试样表面上有灰色包覆层，见表 7。

表 7 U 型管应力试验中 pH 值与密度的变化

金属类型		150°F 10.5lb/gal	150°F 13.1lb/gal	365°F 10.5lb/gal	365°F 13.1lb/gal
C4130	7d	9.8	9.8	9.8	9.8
	30d	9.5 ^①	10.3	8.7	10.1 ^{①、②}
420	7d	9.8	9.8	9.8	9.8
	30d	9.2	9.7	8.6	10.5 ¹
Cr22	7d	10.1	10.2	8.9	9.7
	30d	9.6	9.7	8.7	10.2

注：KHCO₂、初始 pH 值为 9.8、N₂加压至 300psi；

①为灰色包覆层；②为轻微点状腐蚀。

(4) 二氧化碳和硫化氢环境。用密度为 12.5lb/gal、pH 值为 9.8 的甲酸钾在 325°F 下进行了两次为期 7d 的试验。甲酸盐盐水直接注入压力腔。一个腔用 250psi 的 CO₂ 和 0.5psi 的 H₂S 加压，而另一个腔仅用 250psi 的 CO₂ 加压。表 8、表 9 和表 10 显示了腐蚀数据和试验结果。

表 8 7d 的腐蚀试验结果

上部空间气体	C4130 (mil/a)	420 (mil/a)	Cr2205 (mil/a)
H ₂ S 和 CO ₂	72	66	59
CO ₂	171	307	—

注：12.5lb/gal KHCO₂、325°F。

表 9 溶液的化学特性和沉淀物

上部空间气体	CO_3^{2-} (mg/L)	$\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ (mg/L)	Fe^{2+} (mg/L)	Cr^{3+} (mg/L)	沉淀 (mg/L)
H_2S 和 CO_2	12136	无法确定	628	111	199
CO_2	10799	67.5	4159	300	11

注：12.5lb/gal KHCO_2 、325°F，7d 腐蚀试验。

表 10 氢的释放情况

上部空间气体	测得的 H_2 (mol%)	腐蚀产生的 H_2 (mol%)	因溶解而产生的 H_2 (mol%)
H_2S 和 CO_2	89.7 ^①	16	73.7
CO_2	54.1 ^②	20.0	34.1

注：12.5lb/gal KHCO_2 、325°F，7d 腐蚀试验；

①为压力上升到 750psi，释放到 500psi；②为压力上升到 640psi，释放到 500psi。

表 8 中所列的金属试样的腐蚀数据是不能接受的，其原因是 pH 值约降低到 8。由于 H_2S 含量少而明显地降低了腐蚀速率。在完成了 7d 的试验后，腔内上部空间的 H_2S 气体减少到原先的 1/10。部分 H_2S 因与金属反应生成了硫化物固相。据发现，甲酸盐可溶于含铁和铬的溶液。分解成草酸离子 ($\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$) 是甲酸的一种分解方式，但是仅仅在 CO_2 试验环境中会发生这种情况，而在 H_2S 试验环境中则不会发生这种情况。然而，在这次试验中产生了大量的氢，足以证明这是甲酸盐的一种分解方式。

- (1) 在含氮环境中，低碳钢、13 铬钢和 22 铬钢在甲酸盐中的腐蚀速率很低；
- (2) 硫化氢和二氧化碳对甲酸盐的腐蚀和分解都有很强的负作用；
- (3) 缓冲剂在某种程度上减轻了酸性气体对甲酸盐腐蚀速率的影响；
- (4) 在惰性气体环境中，甲酸盐在较长的热老化期间，因甲酸盐的热分解会产生大量的氢、甲烷和一氧化碳。

1.5.2 用甲酸盐钻井液钻高温高压井

Huldra 油田是一个凝析油田，从挪威北海海域的 30/2 区块延伸到 30/3 区块。1979—1991 年在该油田共打了 3 口探井，已证实该油田产天然气和凝析油。

Huldra 油田的钻井条件接近于高温和高压条件，储层压力为 $675 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，温度为 150°C，关井压力为 $535 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。孔隙压力与破裂压力梯度之间的差很小，为 0.12~0.14。该油田产出气中含 3%~4% 的 CO_2 和 9~14 $\mu\text{g/g}$ 的 H_2S 。

钻第一口生产井时使用的是油基钻井液，当下滤沙网时发生了井涌，是由漏失和重晶石沉降双重原因造成的。

与油基钻井液相比，甲酸铯/甲酸钾钻井液的主要优点是：

- (1) 不会发生沉降；
- (2) 当量循环密度低；
- (3) 由于钻井液体系中的固相含量低以及固相沉降的可能性小，所以防砂网堵塞的风险低；
- (4) 钻井液中的堵漏材料为碳酸钙颗粒；

- (5) 对天然气的溶解度低;
- (6) 可以向海洋排放;
- (7) 具有很好的热稳定性。

甲酸铯和甲酸钾的成本要比标准钻井液体系高得多,这意味着一旦发生漏失会大幅度增加钻井成本。其他需要考虑的问题是:

- (1) 根据渗透率恢复值实验的结果,甲酸铯/甲酸钾钻井液对地层的伤害是可以接收的;
- (2) 地层评价问题是容易处理的;
- (3) 估计不会发生与橡胶件和地层水不相容的问题。

4口井的 $9\frac{5}{8}$ "套管下到油层顶部以上20~30m处。油层由砂页岩互层以及煤层和石灰岩层组成。在钻井作业和安装滤沙网期间没有遇到井眼失稳问题。在钻油层时,使用了随钻压力测量短节来监测静态钻井液密度、当量循环密度和井眼清洁情况。

为了降低漏失的风险,把当量循环密度控制在 1.96 g/cm^3 ,井下静态钻井液密度控制在 $1.90\sim 1.91\text{ g/cm}^3$,排量控制为 $900\sim 1100\text{ L/min}$ 。钻粘土层时的当量循环密度要高于钻砂岩层的当量循环密度。因为粘土层会产生低密度固相,而这些低密度固相很快变成钻井液的增粘材料。根据钻井液设计,低密度固相的含量应保持在 20 kg/m^3 左右。而实测的MBT值指出,低密度固相的含量低于 10 kg/m^3 。在使用甲酸铯/甲酸钾钻井液钻井期间,钻井液处于剪切稀释状态。据估计,过高的黄原胶生物聚合物含量可能影响井眼清洁的效果。

在 $8\frac{1}{2}$ "井眼中的总漏失量为 $25\sim 30\text{ m}^3$ 。4口井油层段的平均长度为 $25\sim 30\text{ m}$ 。没有发现碳酸钙的静态和动态沉降。

使用甲酸铯/甲酸钾钻井液可以节省钻机占用时间的原因是:①起下钻速度快;②下套管速度快;③与常规钻井液相比,钻井液处理少,而且短起下钻次数少。

使用甲酸铯/甲酸钾钻井液后,钻柱的最低摩擦系数为0.22,比油基钻井液的摩擦系数高得多,与水基钻井液相似,但套管磨损情况与使用油基钻井液类似。

用甲酸铯/甲酸钾钻井液和Huldra油田的岩心进行了地层伤害实验。岩心试样的渗透率分别下降了 $30\%\sim 70\%$,但岩心经有机酸浸泡之后,岩心的渗透率恢复为 100% 。试验结果表明,甲酸铯/甲酸钾钻井液侵入地层的深度不大,不会对油井产能造成影响。

在钻油层时,使用了210目和230目的振动筛。钻穿油层后立即停止加碳酸钙。

下防砂网后,在防砂网的上方下一特制的封隔器和旋塞组合,这一组合的作用是控制下完井设备时的压力。下完井设备和油管悬挂器并进行压力测试。此时用密度为 1.18 g/cm^3 的氯化钠封隔液替出甲酸铯/甲酸钠盐水。为减轻伤害,在封隔液的前方加 30 m^3 的甲酸钾段塞。在完井期间通常要漏失 $10\sim 20\text{ m}^3$ 甲酸盐水。

2 新型钻井液加重材料

2.1 四氧化锰加重材料

钻井液的低剪切力(低于 1 s^{-1})粘度是区分钻井液有无沉降现象的一个重要参数,由于绝大多数钻井液采用重晶石加重,因此对沉降的研究多集中于含有重晶石的钻井液。

贝克休斯公司使用专利加重材料——Micromax开发出一种逆乳化钻井液。这种加重材料是四氧化锰,与重晶石颗粒相比,四氧化锰具有粒径小、颗粒呈球形的特点。由于球形颗

粒的粒间摩擦很小，塑性粘度大幅度降低。虽然四氧化锰的密度比重晶石大得多，但其颗粒的尺寸却比重晶石小得多，这意味着这些颗粒可以被弱结构的钻井液所支撑，同时在较低的屈服值下不会增加沉降的风险。

这种加重材料可以提高钻井液的流变性能，同时降低加重材料发生沉降的趋势。预期可在高温/高压井和小井眼中使用。对于高温/高压井，减轻沉降趋势和降低塑性粘度能大幅度降低钻井时间，同时这种加重钻井液能减少井下漏失。连续管钻井和过油管钻井的发展也为这种钻井液提供了潜在的市场。

从健康与安全的角度来说，本应考虑细颗粒尺寸和粉尘所带来的问题。但这一问题可通过事先将加重材料与钻井液混合来避免。压井用的钻井液被运输到井场上，其中部分钻井液被油和盐水稀释成所需密度的钻井液。这一操作安全可靠，并能极大地简化采用非标准加重材料所带来的诸多问题。

2.2 用四氧化锰复配的新型钻井液

过油管旋转钻井是一种延长老油田寿命的技术。过油管钻井需要使用能满足各种钻井需求的低粘度钻井液。壳牌勘探和开发公司研制出一种过油管钻井的钻井液，这种钻井液与常规钻井液的最大差别是用四氧化锰代替了重晶石。由于四氧化锰具有颗粒尺寸小、球形形状和密度大（4.8g/cm³）等特点，使其成为低粘钻井液的理想加重材料。使用四氧化锰替代重晶石可改善钻井液的流变性，提高水马力。

过油管钻小井眼的特点是钻杆直径小而且环空狭窄，在相同流变性的情况下会产生比常规井高的当量循环密度，因此需要低粘钻井液。但是钻井液的粘度不能太低，否则很可能发生加重材料沉降，过油管旋转钻井很可能加剧产生沉降的条件，而使钻井作业更困难。使用四氧化锰作为加重材料是一种理想的方法。由于这种加重材料的沉降趋势低，所以能复配出粘度很低的钻井液。在特定的密度下，四氧化锰加重钻井液的塑性粘度要比重晶石加重的钻井液的塑性粘度低 50%~60%。

在多数油基钻井液中，只要对配方稍加修改就可用四氧化锰替代重晶石。为防止重晶石沉降，重晶石加重的钻井液的屈服值一般为 20 lbs/100ft²。而四氧化锰加重的钻井液的屈服值为 8~10 lbs/100ft²时就能防止重晶石沉降。

在 North Cormorant 油田侧钻在第一口井使用的钻井液配方和参数见表 11。

表 11 钻井液配方和钻井液特性

组 分	含量 (bbl)
基油	0.579
有机粘土	1.4
乳化剂 A	0.92
乳化剂 B	0.37
聚合物降失水剂	2.0
防沉降添加剂	5.0
石灰	7.0
氯化钙	13.5
水	12.0

续表

组 分		含量 (bbl)
碳酸钙		309.9
四氧化锰		根据要求
特 性	密度	1.76g/cm ³
	塑性粘度	13 mPa·s
	屈服值	9 lbs/100ft ²
	静切力	4~6 lbs/100ft ²
	乳化稳定性	680 volts
	高温高压滤失量	4.0 mL/30min

第一口过油管旋转侧钻井 (CN24s2 井) 是从 5½" 油管侧钻 4½" 井眼, 用四氧化锰加重的钻井液在 7d 内打了 2285ft 长的井段。按照设计, 把密度为 1.93 g/cm³ 的钻井液运送到井场, 然后稀释到 1.6g/cm³。钻井过程很顺利, 造斜角为 52°~64°, 到达设计深度时降斜到 13°。钻井液性能稳定, 在低排量下井眼清洁效果良好。唯一的变化是添加了 0.7 lb/bbl 的有机粘土把切力从 2.5Pa 调整到 4 Pa。整个井段的平均机械钻速为 43.9ft/h, 以旋转方式钻进时的机械钻速为 49.8ft/h, 以滑动方式钻进时的机械钻速为 33.5ft/h。

第一口井完成两周后, 开始钻第二口井 (井号为 CN18s6)。第二口井的钻井液特性见表 12。第二口井是从 5" 油管侧钻 4½" 井眼。钻进时使用的是双中心钻头。侧钻井眼长度为 2451ft。井斜由最初的 66°降低到 22°。这口井所需的静钻井液密度与地层破裂压力间的密度差为 0.24 g/cm³。

表 12 钻 CN18s6 井的钻井液特性

特 性	最 低	最 高	典 型
密度 (g/cm ³)	1.61	1.64	1.62
塑性粘度 (mPa·s)	18	19	19
动切力 (Pa)	4	6	5
高温高压滤失量 (mL, 200℃)	0.4	1.8	0.4
油水比	72/28	81/19	75/25
当量循环密度 (g/cm ³)	1.72	1.79	1.67

同时使用这种钻井液打了第 3 口井, 并取得成功。通过 3 口井的实践表明, 四氧化锰加重的钻井液是成功进行过油管旋转钻井的最佳钻井液, 但是四氧化锰加重的钻井液的成本较高。另外, 壳牌勘探和开发公司还考虑在对当量循环密度敏感的过油管滑动钻井中使用这种钻井液。

3 保护油气层

3.1 地层伤害的新机理

地层伤害可以发生在钻井、完井、生产和采取增产措施期间。地层伤害可以使油井减