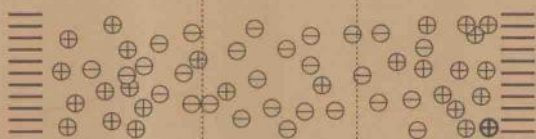
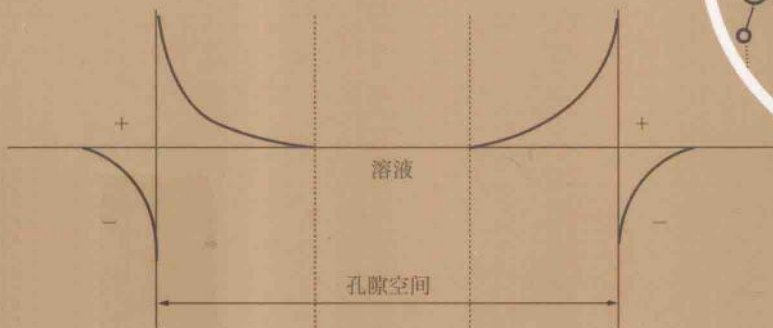
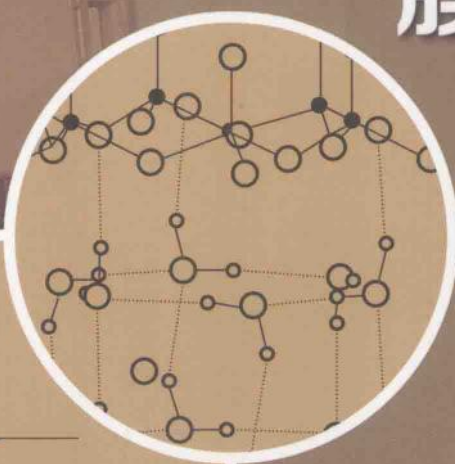


水基钻井液成膜

理论与技术

孙金声 蒲晓林 等著



石油工业出版社

水基钻井液成膜理论与技术

孙金声 蒲晓林 等著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书对水基钻井液半透膜、隔离膜、超低渗透膜处理剂的合成或形成理论与作用机理,双膜封堵保护储层作用机理和技术做了较全面的论述。还介绍了纳米膜水基钻井液、超低渗透膜钻井液技术及现场应用实例分析等。

本书可供从事钻井液理论与技术研究人员、现场技术人员、石油院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

水基钻井液成膜理论与技术 / 孙金声, 蒲晓林等著

北京: 石油工业出版社, 2013.11

ISBN 978-7-5021-9765-0

I. 水…

II. ①孙…②蒲…

III. 水基钻井液

IV. TE254

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 215116 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.com.cn

编辑部: (010) 64523563 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013 年 11 月第 1 版 2013 年 11 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 13

字数: 316 千字

定价: 50.00 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

《水基钻井液成膜理论与技术》编委会

主 任：孙金声

副主任：蒲晓林

委 员：张 洁 杨 枝 林喜斌 任福深

张希文 卜 海 张艳娜

前 言

石油和天然气是我国最重要的一次性能源，对国民经济建设有重大影响。钻井工程是油气勘探与开发重要的生产技术手段，其成本约占总成本的 50%。井筒完整性（井壁稳定、井壁坚实不漏等）和目标地层有效性（储层保护）是长期以来钻井过程中尚未圆满解决的世界性难题。钻井过程中井壁垮塌及井漏造成的直接经济损失巨大，其所引起的固井质量差、储层伤害等间接经济损失更为严重。钻井过程中储层伤害严重影响新油田的发现和油气井产量，据统计，我国约 80% 的井存在储层伤害。储层保护一直是国际石油工程界最为关注的重大技术攻关方向之一，是一项亟待解决的重大国际性难题。目前国内外主要是通过隔绝性的暂堵技术和提高钻井液液相的抑制性来保护储层，研究重点主要是针对储层表面通道的物理封堵技术。但传统物理封堵技术选择暂堵剂的规则和方法受储层介质表面通道的非均匀性和非确定性制约而具有明显的局限性。其技术虽然在有些油田保护储层有很好效果，但在另一些油田却效果不佳。暂堵剂选择不当时，甚至导致储层伤害更加严重。

随着石油钻井工程向更深、更快、更经济、更清洁、更安全方向发展，对决定钻井工程成败的钻井液技术提出了更高的要求，仅仅依靠传统的钻井液防塌、堵漏、储层保护技术难以应对油气钻井工程中面临的重大技术难题，必须研究和发展新理论、新方法、新产品和新技术才能在攻克重大技术难题上有所突破。

针对油气钻井中的井筒完整性和目标地层有效性提出的重大技术难题，国家与中国石油天然气集团公司陆续设立重大科技项目，经过 10 余年持续攻关，在基础理论与应用技术方面均取得重要进展。其中，提出了水基钻井液成膜（半透膜、隔离膜、超低渗透膜及“双膜”保护储层）理论，形成了多项具有自主知识产权的关键技术，经过全面推广应用，取得了技术与生产显著效果。

随着钻井液技术的发展，相关理论、技术和方法有很多进展，笔者将相关研究成果编写并出版《水基钻井液成膜理论与技术》一书，以供石油科研院所、高校、石油勘探公司等相关研究人员参考使用。

本书共六章，各章由相关技术的主要研究人员编写。第一章“绪论”由孙金声、卜海编写；第二章“半透膜水基钻井液理论与成膜技术”由孙金声、任福深、蒲晓林、林喜斌、张艳娜编写；第三章“隔离膜水基钻井液理论与技术”由孙金声、蒲晓林、张洁编写；第四章“超低渗透膜水基钻井液理论与技术”由孙金声编写；第五章““双膜”保护储层钻井液理论与技术”由孙金声、杨枝、张洁、张希文编写；第六章“现场应用典型实例”由孙金声、卜海、张希文编写。本书由孙金声、蒲晓林统编和修改。

本书在编写过程中，得到了中国石油集团总部、中国石油钻井工程技术研究院、相关油气田单位领导以及有关院士、专家的大力支持，在此一并致谢。书中不妥之处，恳请各位专家和学者批评指正，以期再版时充实提高。

孙锦 蒲晓林

2013 年 7 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 水基钻井液成膜技术的发展	1
第二节 半透膜水基钻井液技术现状	3
第三节 隔离膜水基钻井液技术现状	6
第四节 超低渗透膜水基钻井液技术现状	9
第二章 半透膜水基钻井液理论与成膜技术	14
第一节 半透膜水基钻井液基础理论	14
第二节 水基钻井液形成半透膜机制	19
第三节 半透膜质量控制	27
第四节 水基钻井液半透膜剂研制	32
第五节 半透膜剂基本性能	42
第六节 半透膜水基钻井液组成与性能	48
第七节 半透膜水基钻井液作用机理	55
第三章 隔离膜水基钻井液理论与技术	61
第一节 隔离膜水基钻井液基础理论	61
第二节 水基钻井液隔离膜剂研制及表征	65
第三节 隔离膜实验评价方法	80
第四节 隔离膜水基钻井液组成及性能	83
第五节 膜清除方法与清除剂	95
第六节 隔离膜水基钻井液作用机理	97
第四章 超低渗透膜水基钻井液理论与技术	101
第一节 超低渗透膜水基钻井液基础理论	101
第二节 超低渗透膜水基钻井液评价方法	104
第三节 超低渗透膜钻井液处理剂	113
第四节 超低渗透膜钻井液技术	116
第五节 超低渗透膜钻井液作用机理	124
第五章 “双膜”保护储层钻井液理论与技术	129
第一节 “双膜”保护储层钻井液基础理论	129
第二节 隔离膜保护储层作用机制	131
第三节 超低渗透膜保护储层作用机制	137
第四节 “双膜”保护储层钻井液配方及性能	140
第五节 裂缝性漏失储层的“双膜”保护储层钻井液	147

第六章 现场应用典型实例.....	163
第一节 半透膜水基钻井液应用实例	163
第二节 隔离膜水基钻井液应用实例	173
第三节 超低渗透膜水基钻井液应用实例	179
第四节 “双膜”保护储层钻井液应用实例	190
参考文献.....	197

第一章 绪 论

第一节 水基钻井液成膜技术的发展

随着二十世纪初旋转钻井方式的工业应用,一种开始为了携出井底钻屑为主要功能的钻井连续循环液体应需而生。初始是用清水作为携出岩屑的载体,随着钻井实践的广泛进行,人们发现自然浑水比清水更有利于岩屑的携带,于是有了“泥浆(mud)”这一早期钻井液(Drilling mud)的代名词,随着井的加深和钻井工程难度的加大,开始人为有意识地研究改善和提高钻井液的工程服务性能,于是逐渐形成了各种具有特征性能的“钻井液体系”(Drilling Mud System)。整个钻井液的发展路线图用清水—浑水—细分散体系—粗分散体系—不分散体系—无黏土相体系。这些钻井液体系发展的核心均是对钻井液中的黏土(主要是配浆土,次为钻屑)处理技术的发展。例如:在初期由于认识到浑水比清水有利于携带岩屑、清洗井底,因而人为的加入分散型化学剂,使较大尺度的黏土颗粒分散到胶体颗粒范围来保持“钻井液性能”的稳定,因而形成了“稳定的分散体系”。但随着井深的增加,所钻地层复杂性的增大(如大段水敏性泥页岩、岩层、石膏层等),很快就发现钻井液中必须加具有抑制作用的添加剂,才能顺利的钻穿这些复杂地层,保持井壁的稳定。这样,钻井液技术处理的原则和目的就从“高度分散”走向了如何能抑制和降低黏土(岩屑)的高度分散,同时又能保持适宜的流变性、造壁性等,因而形成了适度分散的“粗分散”钻井液体系。随着技术水平的提高,抑制黏土分散的方法和处理剂得到发展,从无机物到有机物、从低级化学剂到高级化学剂进而形成了“不分散、低固相聚合物钻井液”体系。在这一发展过程中,人们为了杜绝因“水”而引起的麻烦,研究了以油为分散介质的钻井液体系,发展了从原油到柴油、白油、植物油和合成烃类化合物。目前,在海上钻深井时,虽然80%以上井使用了油基钻井液体系,但是由于成本因素及日益严格的环保限制,国内钻井及国外陆地钻井主要还是采用水基钻井液体系。

纵观钻井液技术的发展,始终是着眼于井筒安全并围绕着“地层稳定”与“钻井液稳定”这一对稳定但又是一对矛盾的“相互转化”、“相互联系”、“相互依赖”又“相互排斥”的过程而发展进步的。近年来,随着油气勘探开发效益和效率要求的提高,已使传统的“钻井液完井液技术”要求凝炼升华为“完井液钻井液技术”要求,即将油气层保护作为油气钻井的第一位要求。为了“地层稳定”,人们开发利用了无机盐(一价、二价、三价以及络合物)抑制剂,阴离子、阳离子、两性离子以及不同官能团不同相对分子质量的高聚物絮凝剂和包被剂。为了“钻井液稳定”,人们开发利用了膨润土类、纤维素类、褐煤类、淀粉类、木质素类、沥青类等系列产品和一些带磺酸基团的聚合物,以达到既能保持地层稳定,又能具有良好钻井液性能的协调统一。钻井液技术的发展已将原始的膨润土—水这一

负电性的初级钻井液分散体系改造成为能够适应多种复杂环境、复杂条件影响的多功能完井液钻井液高级分散体系。

在油气钻井中,井壁稳定性问题一直是钻井工程的重大技术难题,虽经过历年无数技术人员的研究,形成过许多防塌钻井液技术,见到过良好的防塌效果,但限于井壁失稳的岩石力学、钻井液流体力学与化学综合作用机制的复杂性,目前仍没有彻底解决,仍然是当前钻井工程普遍存在的井下复杂情况之一。当前,我国老油田尽管绝大部分井均能钻达目的层,但井塌现象仍然普遍存在,井径扩大率偏大,不能完全满足井眼质量的要求。而新区钻探时,由于对地层岩石物理化学组构特性和岩石三压力剖面认识不清,防塌措施缺乏准确预测性和针对性,钻井过程井塌仍然不断发生,尤其是在西部深井钻井,钻遇山前强地应力构造和大段泥页岩、特别是盐膏井段过程中井壁失稳问题表现得尤为突出。当前有效的防塌剂如沥青类、腐殖酸类产品,因荧光级别或颜色深经常被地质与环保部门禁用,给井壁稳定问题的解决更增加了难度;此外,钻进多压力层系井段、强地应力作用下山前构造带、煤层、玄武岩、辉绿岩、凝灰岩、石灰岩、岩膏层、含盐膏软泥页岩等非泥页岩地层时,井壁不稳定问题以及井壁失稳诱发的井下复杂情况仍然相当严重。因而为了攻克此难题,必须继续加强研究井壁稳定技术。

众所周知,水进入近井壁泥页岩地层是井壁失稳的主要原因之一,水的进入一方面使得近井壁地层岩石孔隙压力增高,围岩有效应力减小,引起井眼周围岩石应力分布发生严重变化与恶化,另一方面,泥页岩岩石吸水后强度降低,引起岩石抗剪力学性质降低,容易发生剪切破坏,导致岩石在高剪切力作用 and 低剪强度弱抵抗下极易发生失稳垮塌。由此可见,井壁失稳的原因之一是由于孔隙压力扩散增大所致,维持井壁稳定的途径之一就在于控制孔隙压力扩散增大的问题上。在过平衡钻井中,若是井眼没有有效的阻隔层,钻井液将会渗入地层,由于地层的低渗透性且已处于饱和状态,即便是极少量的滤液渗入地层,也会在近井眼地带引起很大的孔隙压力,导致井眼的不稳定。因此,采用水基钻井液钻井时,首先必须采取一切技术手段阻止水进入地层。水进入地层的推动力主要有:静压差、动压差、渗透压差、毛细管力,减小这些推动力的大小,或者改变推动力的方向,均对防塌有利有效。其次,降低水进入地层的速度和总量,改变水的性质,也是防塌的有效技术手段。

石油钻探的目的是为了发现油气层和正确评价油气藏,以及最大限度的开发油气层。从钻开储层到固井、射孔、试油、修井、取心以及进行增产措施如压裂、酸化、注水过程中,由于外来液体和固相侵入储层,与储层中的黏土及其他物质发生物理化学作用,使井眼周围油层渗透率下降形成低渗透带,增加油流阻力降低原油产量导致储层伤害。储层伤害使原油产量降低,储采比降低,这一问题对中、低渗透性的油层至关重要,对于高渗透油层的危害亦不可忽视。因此,钻井过程中储层保护技术一直是国际石油工程界最为关注的重大技术难题之一,不仅影响储层的发现和油气井产量、试井与测井资料的准确性,严重时可导致误诊,漏掉甚至“枪毙”储层。控制储层伤害已成为油田勘探开发中的重要课题。

井漏是钻井过程中最普遍最常见的井下复杂情况之一,在钻遇压力衰竭地层、裂缝发育地层、破碎或弱胶结性地层、高渗储层以及深井长裸眼大段复杂泥页岩和多套压力层系

等地层时,钻井液漏失问题非常突出。井漏诱发的井壁失稳、因漏致塌、致喷问题是长期以来油气勘探开发过程中的世界性难题,是制约勘探开发速度的主要技术瓶颈。同时井漏造成钻井液损失巨大,而在储层漏失对储层伤害引起的损失更是难以估量。我国西部深井钻井过程中同一裸眼井段往往穿越多套压力层系,东部钻调整井由于注水地层压力系统遭到破坏,井漏以及因井漏导致的井下复杂情况也相当严重,各种井漏问题亟待解决。提高地层承压能力是解决井漏问题的主要手段,因此,探讨提高地层承压能力的技术、方法及其机理,对于减少因井漏带来的经济损失特别是对减少储层伤害具有重要意义。

水基钻井液的护壁防塌作用有多种途径和方法,其中三大基本方法为:密度支撑、封堵防透、抑制水化。本书阐述的成膜防塌技术是一种新的防塌钻井液技术方法,着眼点仍然在井壁泥页岩岩石上,属于化学与物理耦合防塌类型,它与在井壁岩石上发生的物理封堵、形成滤饼等具有不同的作用原理和含义,但却有相似而程度不同的防塌作用效果。井壁岩石表面如果存在半透膜,采用活度平衡原理可以利用膜两相流体之间渗透压差控制流体中溶剂介质朝向地层岩石或朝向井筒内的流动方向,充分发挥渗透压差的作用,从而达到阻止或减小井壁泥页岩因吸水发生的不稳定现象,起到防塌或者辅助防塌的作用效果。类似原理,如果在储层井壁岩石上也存在半透膜,则可以起到保护储层的作用效果。进而,如果在泥页岩地层和储层岩石上能够形成完全隔离水的膜类物质,且膜强度足以承受垂直于膜面静动压差和切向流体冲蚀的作用,不仅将对防塌和储层保护起到更理想的正面作用,而且会丰富防塌和储层保护技术手段,更好地满足钻井工程的技术需要。此外,如果在地层钻开后,能够迅速在井壁岩石孔隙或微裂缝中形成一层渗透率接近于“零”的封堵膜且具备较高的承压强度,将对井壁稳定起到良好作用效果。

水基钻井液成膜技术就是要使钻井液具有成膜能力,在井壁上形成半透膜,并在一定条件下转变为完全不透水的隔离膜,即在井壁外围形成保护层,阻止井筒中的水及钻井液进入地层,有效地防止地层吸水后水化膨胀,防止井壁坍塌,防止地层介质通道内黏土颗粒的运移,保护储层。成膜技术形成封堵膜,就是希望通过在井壁岩石表面形成一层低渗透封堵层,有效封堵渗透性地层和微裂缝泥页岩地层,阻止钻井液固相和液相侵入地层,达到防塌和保护储层的效果。

成膜水基钻井液与井壁泥页岩接触后在其表面形成一种具有调节、控制井筒流体与近井壁地层流体系统间传质、传能作用的膜,以达到稳定井壁、防漏堵漏和保护储层的目的,该项技术的研究与成功应用必将使钻井工程中的井壁稳定技术、储层保护技术甚至防漏技术水平提高到一个新的高度,对于提高油气勘探开发的成功率、油气钻井的井下安全、储层保护甚至于环境保护都具有积极意义。

第二节 半透膜水基钻井液技术现状

国外对水基钻井液中“半透膜”特性的研究可认为是稳定井壁和保护油气层的一种新的机理认识,已经从早期水基钻井液有没有“半透膜”的探讨发展到了如何利用水基钻井液的半透膜作用保持井壁的稳定、提高保护油气层的效果,并同时满足环保要求。

“半透膜”作用是一种物理现象，很早就已经移植到钻井液上来作为解释油基钻井液稳定井壁的机理。根据杜南 (Donnan) 平衡理论：当一个容器中有一个半透膜，膜的一边为胶体溶液，另一边为电解质溶液时，电解质的离子能够自由地透过此膜，而胶粒不能，则在达到平衡后，离子在膜两边的分布将是不均等的，这个体系即称作杜南体系 (Donnan System)，膜两边称作两个“相”，把含胶体的一边称为“内相”，仅含自由溶液的一边称为“外相”。在这种情况下，胶粒不能透过此膜的原因是由于孔径较小的半透膜对粒径较大的胶粒的机械阻力。之后发现，实际上并不一定需要一个半透膜的存在，只要能够使“胶粒相”与“自由溶液相”分开，都能组成一个杜南体系。例如一个土壤泥糊与其上部的平衡溶液或者胶体的离心沉淀物与其离心溶液都可以形成。当黏土表面吸附的阳离子浓度高于介质中的浓度时，便产生一个渗透压，从而引起水分子向黏土晶层渗透扩散。水的这种扩散程度受电解质浓度差的控制，因此，它是渗透水压膨胀的机理。钻井液技术中早在 1931 年便应用这一理论，提出使用溶解性盐以降低钻井液和坍塌页岩中液体之间的渗透压差，后来进一步发展成了饱和盐水钻井液、氯化盐钻井液等。

在油基钻井液中，采用“活度”这一名词来表示钻井液或泥页岩的“化学势能”，或叫“化学位”，水总是从高化学位端流向低化学位端。油基钻井液的活度如果保持稳定，一般为 0.70 ~ 0.75，含有矿物质的地层水的活度高于油基钻井液的活度，水向井壁地层的运移就不会发生，所描述的正是这一渗透水化机理。乳化水滴与泥页岩接触，所形成的束缚水薄膜相当于一个半透膜，当泥页岩中水的化学位小于钻井液中水的化学位时，水就会从钻井液向岩层中运移。反之若钻井液中水相的化学位小于岩层中水的化学位，则水的运移方向相反。在油基钻井液中提高水相的盐度（如用高浓度的 CaCl_2 水溶液），就是为了减小钻井液的化学位，而使泥页岩中的水流向钻井液中，从而避免了泥页岩的水化，保证了井壁稳定性。

半透膜对泥页岩水化的影响一直是钻井液防塌理论研究中有争议的问题，一些研究得出由钻井液向泥页岩驱动水的动力之一是钻井液与泥页岩的水化学势之差，影响它的主要因素是钻井液压力与孔隙压力之差及钻井液水活度与泥页岩水活度之比，只有存在较高效率的半透膜时，钻井液与泥页岩的水活度之差才能在较长时间内控制水的迁移。对泥页岩存在半透膜有不同的看法，部分学者认为受到较强压实作用的泥页岩或孔隙低的泥页岩，其自身可以起到半透膜作用，但可能在几十分钟或几十小时内就消失，但可以加入特种处理剂来提高泥页岩的膜效率。另一部分人认为泥页岩本身可作为一种半透膜，但它是一种非理想的半透膜，其效率不是 100%，可用反映系数来表征膜的理想性，也作膜效率。水基钻井液可通过加入无机盐降低活度来减缓泥页岩水化膨胀。

Mondshine 和 Kercheville 在实验中发现乳化的水相可穿过油 / 水界面而运移，具有反应活性，而且由于泥页岩中水活度和油基钻井液中水相活度的相对高低，泥页岩既可发生水化也可发生去水化作用。美国 Chenevert 在 1970 年测定了泥页岩在不同活度的油基钻井液中的线性膨胀率，发现钻井液中水相活度越高，膨胀率越大，而当钻井液中水相活度低于泥页岩中水活度时，泥页岩发生负膨胀，即收缩。Hale 等在 1992 年测定了泥页岩用不同活度的油基钻井液处理后的力学性能，发现当钻井液活度较低时，泥页岩的强度会增加。上述泥页岩出现去水化、收缩、强度增加等现象，是钻井液与井壁泥页岩间存在半透膜活度

平衡防塌理论的依据。Chenevert 和 Sharma 提出了“总水位”(即总的水化学位)的概念,指出总水位的影响因素包括液压、温度、渗透作用、表面电荷作用等,这是对活度平衡理论更加深入的探讨。

1993 年, F.K.Mody 等人用模拟井下条件的 Oedometer 型实验舱以不同水活度的水溶液与 pierre 泥页岩岩心相互作用, 得出 pierre 泥页岩在 13.8MPa 或更高压实应力下有显著的半透膜特性。1994 年中国石油勘探开发研究院钻井工艺研究所与美国得克萨斯州立大学, 用同位素示踪技术证实了泥页岩的半透膜作用并测定出其膜效率。

CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) 和 Baroid 报道筛选研制出了具有成膜效能的三种新型化合物, 它们的膜效率在 55% ~ 85% 之间。形成了具有高膜效率的新型水基钻井液, 在泥页岩地层稳定方面发挥着类似于油基钻井液的作用, 有助于满足今后石油工业的技术需求。还研制了专门测定膜效率的实验装置, 可以模拟钻井液和泥页岩间的相互作用。但是这些产品的组分、结构、作用机理及是否进行了现场应用未见报道。

根据国外文献调研, 已经肯定几种钻井液体系可以形成半透膜, 并在现场见到了好的防塌效果, 分别为: ①多元醇类钻井液体系; ②甲基葡萄糖甙钻井液体系; ③硅酸盐钻井液体系。其中膜效率最好的首推硅酸盐钻井液体系, 下面分别介绍这几种钻井液体系的成膜防塌特点。

(1) 多元醇类钻井液: 多元醇属于非离子聚合物, 具有“浊点”效应。它的亲水性受温度影响, 当温度低于一个临界值时, 聚合醇溶于水, 显水溶性; 当温度高于临界值时, 多元醇在水中分散, 表现出憎水的特性。在钻井作业中, 随着井深的增加, 井温不断升高, 可利用井温的变化和多元醇的浊点效应来实现预定的技术思路, 根据这种设想研制出多元醇类防塌水基钻井液。多元醇分子链束在钻屑表面附着而形成一层憎水膜, 抑制钻屑的水化分散, 提高地面的固控效率, 维护钻井液流变性的稳定。多元醇分子链束在钻屑和井壁上附着, 形成一层类似于油基钻井液半透膜的憎水性连续分子链束膜, 提高井壁稳定性。当钻井液返回到地面时, 因温度降到临界点以下, 多元醇又恢复其水溶性, 使分子链束膜从钻屑表面脱附而进入钻井液体系, 降低多元醇的损耗。

(2) 甲基葡萄糖甙 (MEG) 钻井液: 研究表明, MEG 钻井液具有良好的抑制性和油气层保护特性, 主要原因是 MEG 处理剂独特的分子结构及由此产生的半透膜效应。MEG 分子结构上有 4 个亲水的羟基, 它可以吸附在井壁岩石和钻屑上, 如果钻井液中 MEG 加量较大, 则在井壁岩石和钻屑上形成一层吸附膜, 可将岩石和水隔开。这一层吸附膜具有半透膜效能, 可通过调节钻井液活度实现活度平衡钻井, 控制钻井液与地层内水的运移, 有效阻止泥页岩水化膨胀, 以保持井壁稳定, 另外 MEG 环状分子上含有 4 个氢氧根, 可与水分子形成牢固的氢键。因此, MEG 钻井液的滤液进入地层后有脱水作用。试验表明, 其脱水效果比 KCl 钻井液和甘油 (丙三醇) 钻井液好, 可防止泥页岩水化分散及微粒的产生, 因而可以大大减少对油气层的伤害。MEG 钻井液完井液具有低的表面张力, 当滤液进入储层后, 返排出来比较容易, 防止或减少水分滞留在油气层, 减少储层渗透率的下降。

(3) 硅酸盐钻井液: 国外对硅酸盐钻井液进行了系统研究, 认为硅酸盐钻井液在维护井眼稳定方面与油基钻井液 (OBM) 一样有效, 并有利于保护油气层。Bailey 等人研究结

果表明,硅酸盐可在泥页岩内沉积,形成一层屏障或膜阻止离子的运动,这种离子膜的膜效率较油基钻井液膜效率小。进一步实验证实,高 pH 值的硅酸盐钻井液会改变黏土的物理化学性质,硅—铝有可能发生重新分布,这对硅酸盐钻井液的抑制性起到了重要作用。硅酸盐钻井液体系能减小压力扩散。硬度试验表明,阳离子聚合物和硅酸盐可提高页岩的硬度,而硅酸盐钻井液的摩擦系数与其他水基钻井液的差别较小。

半透膜水基钻井液的成膜机理可以分为以下几类:

(1) 钻井液和泥页岩的相互作用: ①通过表面吸附形成高黏度的层状聚合物分子连续层(薄膜),如水溶性聚合物+交联剂,能与水和矿物表面形成氢键的凝胶; ②通过堵塞/充填成胶和沉淀,当溶液 pH 值、电解质类型及浓度发生变化时,成膜聚合物发生相转移,从而堵塞、充填空隙。

(2) 电解质作用: ①利用在泥页岩井壁上形成扩散双电层,阻止溶剂出入; ②改变黏土表面性质,利用阳离子聚合物改变泥页岩黏土片的带电性能。

(3) 功能分子的吸附: 利用 H 键、范德华作用力、孔隙堵塞作用、井壁覆盖作用或改变溶质—孔隙的尺寸比例将功能分子附着在井壁、泥页岩表面上。

(4) 黏土改造: 通过成膜剂的加入在黏土片之间(端表面和平表面)发生反应,形成“柱状”黏土。

各种成膜钻井液和成膜处理剂的作用机理不可能完全相同,也不一定就是其中单独的一种,应区别对待。

井壁岩石表面如果存在半透膜,采用活度平衡原理可以利用膜两相流体之间渗透压差控制流体中溶剂介质朝向地层岩石或者朝向井筒内的方向流动,充分发挥渗透压差的作用,从而达到阻止或减小井壁泥页岩因吸水发生的不稳定现象,起到防塌或者辅助防塌作用效果。但是,国内外的研究表明,天然泥页岩的半透膜是非理想膜,非理想则意味着膜是渗漏的,溶质没有完全阻止透过膜。至于如何将泥页岩的非理想膜改善成为理想膜或接近理想半透膜的机制,是长期以来研究井壁稳定问题过程中未能解决的重要难题,也是钻井液前沿基础性理论研究的待研问题。

第三节 隔离膜水基钻井液技术现状

钻井液是石油工程中最先与油气层相接触的工作液,其类型和性能的好坏直接影响到井壁是否稳定和对油气层伤害的程度。井壁失稳是影响井眼规则和钻井综合效益的关键因素之一。对国内数百口井的统计说明,90%以上的井塌发生在泥页岩地层,其中硬脆性泥页岩地层约占三分之二,软泥页岩地层约占三分之一,国外的统计结果与此一致。

为了解决井壁稳定及多压力层系地层保护油气层技术难题,发展了屏蔽暂堵技术。此项技术利用油气层被钻开时,钻井液液柱压力与油气层压力之间形成的压差,在极短的时间内,在钻井液中人为加入的各种类型和尺寸的固相粒子进入油气层孔喉,在井壁附近形成渗透率接近零的屏蔽暂堵带。此带能够有效阻止钻井液对油层的继续污染,从而减缓了浸泡时间增长对油层的伤害。完井后,由于屏蔽环极薄很容易被射穿或被酸溶解,因而也

称暂时性堵塞,屏蔽暂堵剂就是钻井液中起主要暂堵作用的惰性添加剂。研究表明,暂堵剂应由起桥堵效果的刚性颗粒和起逐级充填作用的粒子及软化粒子组成。架桥和充填颗粒通常使用各种粒度的碳酸钙,可变形粒子常用油溶性树脂、石蜡和沥青等。

实施屏蔽暂堵技术的关键在于储层孔喉与钻井液中暂堵剂颗粒的尺寸大小和分布上的合理匹配,即根据储层孔喉尺寸及分布优选暂堵剂。

自20世纪90年代后期,为了解决强水敏和强应力泥页岩地层的井壁稳定问题,钻井技术人员开始研究开发和应用了多元醇水基钻井液,该体系主要通过聚乙二醇的浊点行为达到封堵效果,其水溶液被加热到一定温度时,会出现微粒而变混浊,这些微粒可封堵地层孔喉并形成致密的表面膜,阻止滤液向地层渗透,避免泥页岩水化分散而造成井眼不稳定。

以上实践表明,钻井技术人员为了解决井壁稳定和油气层保护难题,一直在有意与无意的把成膜的理念运用于水基钻井液中以提高其效能。根据本章第一节中的分析,当采用过平衡钻井钻进泥页岩地层时,若井壁上没有有效的封隔层,那么钻井液就会渗入地层,从而引起钻井液的支撑能力下降,导致井壁不稳定。为了减少钻井液的压力渗透,可通过在井眼处产生一层隔离膜或是减小泥页岩的水化分散来实现,隔离膜可以起到这种作用。

钻井液形成的隔离膜是指成膜钻井液和井壁岩石发生物理、化学作用,在井壁上形成一层非渗透性薄膜,在一定压差下阻止任何物质的通过,而且具有一定的强度、韧性和厚度,这种膜的组成不是传统的惰性固体物质,而主要是特种聚合物。在井壁岩石表面形成的隔离膜是一种非选择性化学封堵作用,克服了传统物理封堵方法(屏蔽暂堵)难以与储层孔喉匹配的缺陷,能够更好的保护储层。

隔离膜研究在国内外是一个十分活跃的多学科交叉领域。在民用方面,有序分子膜组装方法目前主要有:Langmuir-Blodgett膜(LB膜)、分子自组装膜和浇铸膜等。LB方法用于气液界面上形成两亲分子的单分子膜,并转移成多层LB膜,广泛地用于制备5~500nm厚度的有机、高分子超薄膜;分子自组装膜可由含特殊端基的长脂链在适当衬底上的化学吸附来实现单分子组装;浇铸膜可由浸渍方法或旋转涂抹法来制备,但很难实现分子有序度和膜纳米尺寸的调控。钻井液中的隔离膜则是通过特种聚合物在泥页岩上的化学吸附或化学反应形成单层或多层吸附。

据报道美国正在研究试验能达到完全隔离效能的水基钻井液,聚合物通过吸附或化学反应在井上形成一层隔离膜,即在井壁的外围形成保护层,阻止水(滤液)及钻井液进入地层,该产品已在海上油气田应用,效果明显,具有很好地稳定井壁和保护储层效果。

传统的隔离膜水基钻井液主要是靠加入一些无机材料,利用它们的尺寸效应封堵地层孔隙,膜效率较低,而如今多集中在聚合物成膜剂的研制上,利用聚合物分子链的交叉和多点吸附成膜或者和其他材料形成复合膜。

CSIRO(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization)和Baroid研发出了能在井壁上形成高效率隔离膜的成膜型化合物,用此化合物优选出成膜型水基钻井液配方,这对维持井壁稳定具有现实指导意义。运用专门的膜效率测试装置和相关的检测手段对新型成膜化合物进行了300多个实验,测定了它们在Pierre II页岩上的成膜能力。新一代的成膜型水基钻井液在页岩地层稳定方面发挥着类似于油基钻井液的作用,能形成

隔离膜的聚合物在井壁上形成分子膜, 现场应用证明具有很好地稳定井壁和保护储层性能。

麦克巴钻井液公司经研究确定了 3 种类型的膜, 分别为:

(1) 水基钻井液成膜 (I 型膜), 这类膜形成于页岩表面, 钻井液滤液、页岩 / 黏土、孔隙流体的化学性、孔隙尺寸、滤液黏度、渗透率、黏土组分和页岩的胶结作用等都会影响膜的形成。在水基钻井液中能够成膜的物质有糖类化合物及其衍生物 (如甲基葡糖苷 MEG)、丙烯酸类聚合物、硅氧烷、木质素磺酸盐、乙二醇及其衍生物和各种表面活性剂 (如山梨糖醇酐的脂肪酸盐) 等。

(2) 封堵材料成膜 (II 型膜), 如硅酸盐、铝酸盐、铝盐、氢氧化钙和酚醛树脂等封堵材料。在实验中发现硅酸盐钻井液中加入糖类聚合物可保持实际渗透压接近理论渗透压, 硅酸盐钻井液的成膜效率可达到 70% 以上。

(3) 合成基和逆乳化钻井液成膜 (III 型膜)。钻井液中的流体和页岩作用导致了毛细管力和较高的膜效率, 此膜是由连续相的可移动薄膜、表面活性剂薄膜和钻井液的水相薄膜组成的膜, III 型膜形成了一道防止水和溶质扩散的屏障。

此外, 麦克巴公司把物理与化学膜相结合的一种成膜技术作为保护微裂缝油气藏技术应用我国南海油田, 单井产量提高了 30% ~ 40%。产品的组分、分子结构及作用机理未见报道, 初步分析是聚合物通过吸附或化学反应在井壁上形成一层膜即在井壁的外围形成保护层, 阻止水及钻井液进入地层, 达到稳定井壁和保护储层的效果。

中国石油大学 (华东) 的丁锐等研制出了一种成膜树脂防塌剂 FGA。它属于非离子型的饱和碳链聚合物, 以其配制的钻井液遇到多孔介质时, 可以向介质内渗滤少量水从而在介质表面形成一层致密且强韧的膜, 阻止水继续进入, 所以具有显著的防止黏土水化膨胀和分散、降低钻井液滤失量和泥饼渗透率的作用, 它与 CMC、K-PPH、SMP 等常用的有机处理剂配伍性较好, 还具有很好的抗盐侵、钙侵的能力和抗温能力, FGA 钻井液已在新疆柴窝堡地区试用, 对松散易坍塌地层起到了明显的稳定作用。

中国石化新星公司钻井研究所的金军斌、于忠厚等研制的新型成膜防塌剂 MFT-1, 主链上全是碳原子, 侧链上全是羟基, 其相对分子质量在 5 ~ 15 万之间, 通过吸附交联, 粘连成膜, MFT-1 具有适当的表面活性, 它通过提高液相黏度, 吸附在黏土颗粒表面, 形成一层致密膜来减小泥饼孔隙而降低滤失量。

西南石油大学的王煦、赵晓东等研制出了两种成膜剂 (JC 和 HZ), 并把它们用于空气雾化钻井中, 这两种成膜剂的相对分子质量在 5 ~ 6 万之间。钻井过程中空气流中含有 JC 和 HZ 的水雾滴与页岩表面随机碰撞接触并铺展成液膜。在液膜形成过程中, 一方面含羟基、 π 键的 JC 分子将通过氢键力、静电引力与页岩的黏土颗粒紧密桥接, 含酚羟基的 HZ 分子可与黏土颗粒中的高价离子发生络合作用而被牢牢吸附在页岩表面上; 另一方面, 水因处于不饱和状态, 在空气流与井温的影响下迅速蒸发, 液膜中 JC 和 HZ 的浓度迅速提高, 与黏土颗粒的桥接或络合作用趋于强烈, 结果在页岩表面形成保护膜, 阻止水与页岩的作用, 当浓度达到一定值时, 相当于页岩表面吸附的成膜剂分子布满单分子层后, 络合吸附达到了极限, 其水化膨胀抑制力就不再增大。

以上国内报道的成膜剂技术都仅仅是依据其一定的作用效果来预测在井壁上形成了膜, 没有理论与实验结果依据。

根据以上分析,在钻井作业中,把成膜效应的思想运用到水基钻井液,这是一种新思路、新技术的前沿基础性理论与应用技术研究,也是钻井液满足稳定井壁和保护储层的一个必然趋势。

隔离膜水基钻井液技术就是从稳定井壁和保护油气层出发,运用稳定井壁的化学、物理固壁新观念、新思路,使钻井液能在井壁上生成高分子膜(隔离膜),在井壁的外围形成保护层,阻止滤液及钻井液进入地层,有效地防止地层水化膨胀,封堵地层层理裂隙,防止地层内黏土颗粒运移,阻止井壁坍塌,保护油气层。

第四节 超低渗透膜水基钻井液技术现状

随着油气勘探开发领域的不断扩展,钻井过程中遇到的地层越来越复杂,在钻遇压力衰竭地层、裂缝发育地层、破碎或弱胶结性地层、低渗储层及深井长裸眼大段复杂泥页岩和多套压力层系等地层时,压差卡钻、钻井液漏失和井壁垮塌等复杂问题及地层伤害问题非常突出。为了解决以上复杂问题,必须阻止井筒钻井流体向非储层及储层漏失和滤失,这也是油气钻井过程中防塌、防漏和保护储层的基本要求。

目前,在正压差条件下的裸眼井段钻进中,阻止井筒流体进入井壁或者地层的技术方法主要有造壁法、成膜法和封堵法。

造壁法是指通过钻井液中降滤失剂与活性固相粒子(膨润土)发生吸附作用,改变活性黏土粒子的表面性质(增加表面 Zeta 电位,增加水化膜厚度)和分散状态,使得在正压差作用下沉积在井壁上的黏土粒子组合(滤饼)具有致密阻水效果。

成膜法是指采用特殊功能的聚合物,通过吸附、沉积在泥页岩孔隙或表面上,使得泥页岩本身或者泥页岩表面上形成选择性通过物质的膜,利用膜两相之间的活度差,控制水流方向,达到阻止或者减小水流入地层的目的。

封堵法包括防塌性封堵、防漏性封堵及储层保护性封堵:防塌性封堵是指通过惰性固体粒子沉积、沉淀在泥页岩孔隙、裂隙甚至裂缝处,形成致密的阻隔屏障,阻挡水的进入和因水进入而同时带来的压力传递,既阻水又提供压力支撑点,保持井壁稳定;防漏性封堵是指通过堵漏材料物质进入漏层内,堵塞或者凝结固化在漏失通道处,形成隔断,阻挡流体通过漏层进入地层,保持钻井液的正常循环,属于这一类型封堵的材料有水泥、桥塞物质、聚合物凝胶等;储层保护性封堵是指针对储层的屏蔽式暂堵,这在本章的第三节已有介绍,就不详述了。

防塌、防漏、屏蔽暂堵材料虽具备各自的专项治理优点,但功能单一,多功能性不强。如能研究出一种能够同时具备防塌、防漏、屏蔽暂堵多功能作用效果的钻井液技术,以弥补现有技术存在的不足,对解决渗透性地层井壁稳定、多套压力层系或衰竭油藏的井漏、井塌、压差卡钻、油层伤害等问题具有重要意义。

因此,近年来提出了超低渗透膜水基钻井液理论与技术,超低渗透膜钻井液又称无渗透或无(低)侵入钻井液。

超低渗透膜水基钻井液在惰性材料对高渗透性介质封堵的基础上,进一步引入人工合