

水平井钻井液与完井液

徐同台 洪培云 潘世奎 主编



石油工业出版社

Petroleum Industry Press

水平井钻井液与完井液

徐同台 洪培云 潘世奎 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书全面、完整地收录了我国近 10 年来水平井钻井液完井液研究的新理论、新观点、新方法、新处理剂和新技术。全书共分为绪论、水平井携岩机理及钻井液流变参数的确定、水平井井壁稳定、水平井降摩阻和保护油气层、水平井钻井液完井液在现场中的应用 5 个部分,从理论到实践,全面、系统、深入地阐述和总结了我国水平井钻井液完井液技术。

本书可用来指导各油田现场钻井液技术人员进行水平井钻井液完井液设计与现场施工,亦可作为他们和院校师生继续深入进行该项目研究的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

水平井钻井液与完井液/徐同台等主编.
北京:石油工业出版社,1999.12
ISBN 7-5021-2848-4

I. 水…

II. 徐…

III. ①油气钻井—定向钻进—钻井液

②油气钻井—定向钻进—完井液

IV. TE254

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 68351 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
北京普莱斯特录入排版中心排版
石油工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 36.5 印张 934 千字印 1—1000

1999 年 12 月北京第 1 版 1999 年 12 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2848-4/TE·2226

定价:75.00 元

前 言

水平井技术是当代油气资源勘探开发的重大技术之一。从 80 年代末期开始,为了提高勘探开发综合经济效益,世界各油公司掀起了水平井的热潮,至 1995 年已钻水平井 12852 口,在生产中取得了重大经济效益。我国是发展水平井技术最早国家之一,60 年代中期在四川打成了磨 3 井和巴 24 井,但限于当时的技术水平,未取得应有的效益。为了追踪国外先进技术,满足我国日益发展勘探与开发的需要,从 1990 年开始,原中国石油天然气总公司科技发展局、钻井工程局等组织 6 个油田和 5 个院校,针对水平井钻井技术中工程设计、轨迹控制、水平井钻井完井液、水平井固井和完井及测井等 5 项关键技术进行攻关,并及时将研究成果在全国各地推广应用,至 1998 年共在 13 个油田钻成了 165 口水平井。这些井的钻成证实了水平井“少井高产”的突出优点,取得了减少油田勘探开发费用,缩短油田建设时间,加快资金回收,少占土地和减少环境污染等一系列经济效益和社会效益。

水平井钻井液完井液是水平井钻井工程技术的重要组成部分,我国各油田与院校钻井液技术人员从 1991 年开始针对该项技术的难点,对水平井井眼净化、井壁稳定、降摩阻、防漏堵漏、保护油气层、钻井液完井液技术等进行研究,取得了丰硕的成果,形成了具有我国特色的水平井钻井液完井液技术,确保了不同油气藏的水平井顺利钻进,并有效地保护油气层,提高油气井产量。这些成果都是我国钻井液技术人员心血的结晶。为了及时总结、推广“八五”和“九五”期间水平井钻井液完井液研究中所形成的新理论、新产品、新技术,进一步提高我国钻水平井的技术水平,特汇编此书,以供广大研究人员和现场工程技术人员参考、借鉴。

全书共分绪论、水平井井眼净化、水平井井壁稳定、水平井降摩阻和保护油气层、水平井钻井液完井液技术 5 个部分。书中文章由各油田、院校钻井液技术人员从“八五”和“九五”研究成果报告中精选出来的,共计 53 篇。这些文章密切结合我国各油气田水平井钻井过程中的实际问题,从理论到实践进行了深入系统地阐述和总结。

编辑时我们尽量做到“全面、系统、完整、兼容”,突出“新意”与“实用”,将研究中提出的新理论、新观点、新方法、新处理剂和应用中的新技术均进行收录,集百家之长,保留原味,一方面让其真实反映出我国水平井钻井液的现状和水平;另一方面也提供百家争鸣的园地。编排时,我们按照基础理论—应用技术的思路来归纳选择排序。同时把每一部分中相同类型、不同观点的文章放在一起,以便读者对比参考。为了让读者就某一个具体问题继续作更深入地了解,我们在编排时保留了原文作者的单位,以便读者能与作者直接联系。

本书从 1997 年下半年开始组稿,由于材料多又不够规范,涉及单位又多,为了全面、真实地反映出研究人员的成果,主编人员历时一年半才完成本书的组稿与审稿。全书由徐同台、洪培云、潘世奎审校。石油勘探开发科学研究院方慧、张颖、孙延平、关岳、沈丹青和刘盈等参加一校稿的校对工作,在此向他们表示衷心的感谢。

本书组编与审稿过程中得到原中国石油天然气总公司勘探局、科技局、工程技术局、石油工业出版社和石油勘探开发科学院钻井所的支持与帮助,本书的出版得到新疆石油管理局钻井公司泥浆技术服务公司的支助,在此一并表示深深的感谢。

由于本书涉及内容多而新,我们的水平有限,编审经验不足,不妥之处在所难免,恳请原文作者见谅,同时请广大读者批评指正。

编者

1999 年 4 月

目 录

第一部分 绪论

水平井钻井液完井液技术·····	(3)
------------------	-----

第二部分 水平井携岩机理及钻井液流变参数的确定

水平井钻井液携岩机理及流变参数的研究·····	(33)
水平井环空携岩机理研究·····	(58)
稠油油藏水平井钻井液完井液流变参数和携岩机理应用研究·····	(70)
水平井钻井液携屑能力研究·····	(93)
水平井水平段钻井液携岩模拟实验研究·····	(103)
水平井环空净化应用工艺技术研究·····	(113)
水平井洗井效果的影响因素·····	(125)

第三部分 水平井井壁稳定

水平井井壁力学稳定性机理研究·····	(131)
水平井井壁稳定的综合分析·····	(172)
井壁稳定力学研究·····	(186)
稠油油藏水平井井壁稳定技术研究·····	(202)
井壁动态稳定实验研究及防塌钻井液体系的评价·····	(209)
水平井井壁稳定性物理化学机理研究·····	(215)

第四部分 水平井降摩阻和保护油气层

钻井液润滑性能的试验研究·····	(223)
水平井钻井液完井液润滑性评价方法及标准·····	(236)
水平井钻井液完井液润滑剂的研制·····	(244)
火山喷发岩裂缝性油藏储层特征、敏感性评价研究初探·····	(250)
钻井完井液对火山喷发岩裂缝性储层损害评价方法及机理研究·····	(258)
预测裂缝性油藏井下原始裂缝宽度新方法研究初探·····	(267)
屏蔽式暂堵技术在裂缝性油藏佳木河组储层的研究·····	(274)
水平井储层损害的室内评价方法·····	(279)
计算钻井液侵入储层深度的数学模型·····	(286)
水平井产能的影响因素·····	(294)
油气层损害对水平井产能影响的计算方法·····	(303)

第五部分 水平井钻井液完井液在现场中的应用

塔里木油田水平井钻井液技术·····	(315)
新疆石油管理局深井水平井钻井液完井液研究与应用·····	(331)
红南 210 水平井钻井液技术实践·····	(344)
长庆安塞地区水平井钻井液研究与应用·····	(354)
两性离子聚合物钻井液在丹 21 水平井的应用 ·····	(369)
低渗透油层水平井钻井液技术研究及其应用·····	(376)
大斜度定向井钻井液技术研究·····	(387)
四川油气田定向井钻井液技术·····	(397)
中原油田卫 2-25 水平井的钻井液应用·····	(403)
江苏油田高 6-平 1 井钻井液完井液技术研究 ·····	(406)
低密度水包油乳化钻井液的研究·····	(418)
低密度高油水比水包油钻井液在任平 1 井中的应用·····	(432)
低密度高油水比水包油钻井液在任平 2 井中的应用·····	(436)
水平井钻井液技术·····	(441)
胜利油田埕科 1 水平井钻井液技术·····	(457)
胜利油田水平 1 井钻井液技术·····	(461)
胜利油田水平 2 井钻井液技术·····	(470)
草 20-平 5 井长裸眼水平井钻井液技术 ·····	(474)
正电胶钻井完井液的研究及在水平井中的应用·····	(477)
两口短半径水平井钻井液技术·····	(483)
大港油田女 MH-1 长半径水平井钻井液完井液设计与应用 ·····	(486)
官 H-1 水平井钻井液完井液设计与应用 ·····	(499)
正电胶钻井液完井液在官 H2 短半径水平井中的应用 ·····	(506)
有机硅防塌钻井液在水平井中的应用·····	(511)
辽河油田稠油油藏水平井钻井液完井液体体系选择与应用研究·····	(519)
吉林油田老平 1 井和民平 1 井水平井钻井液技术·····	(544)
大庆油田水平井生物聚合物小阳离子钻井液配方的研究与应用·····	(551)
水平井油包水钻井(完井)液技术研究·····	(565)
新疆油田水平井钻井液完井液现场应用·····	(572)

第一部分 绪 论

水平井钻井液完井液技术

徐同台

(中国石油天然气集团公司)

洪培云

(华北石油管理局)

水平井是指井斜角达到 90° 左右并延伸一定距离的井。水平井基本上可分为 3 种类型:长曲率半径水平井(曲率半径 $300\sim 600\text{m}$,造斜率小于 $6^\circ/30\text{m}$);中曲率半径水平井(曲率半径 $100\sim 150\text{m}$,造斜率 $6^\circ/30\text{m}\sim 20^\circ/30\text{m}$);短曲率半径水平井(曲率半径 $5\sim 15\text{m}$,造斜率 $1^\circ/30\text{m}\sim 10^\circ/30\text{m}$)。

为了提高油井产量,美国于 1929 年在加利福尼亚州钻了几米长的完全水平的分支井筒,并开始在垂直的老井钻曲率半径小的短半径水平井。50 年代中期至 60 年代中期,原苏联等国亦开始钻水平井,但由于受经济方面和当时的技术条件的限制,水平井钻井技术发展迟缓。随着定向井钻井技术和测试技术的发展,从 80 年代开始,世界各油公司为了提高勘探、开发综合经济效益,水平井钻井规模呈现迅速发展趋势,至 1995 年已钻水平井 12852 口,在生产中取得了重大经济效益,水平井技术成为当代油气资源勘探开发的重大技术之一。我国是开展水平井钻井最早国家之一,1965 年和 1966 年我国在四川打成了磨 3 井和巴 24 井两口水平井,但限于当时的技术水平,只能是探索,未能取得应有的效益。从 1990 年开始,为了追踪国外先进技术,满足我国日益发展勘探与开发的需要,原中国石油天然气总公司科技发展局、钻井工程局等组织 6 个油田和 5 个院校,针对水平井钻井技术中工程设计、轨迹控制、水平井钻井完井液、水平井固井和完井及测井等 5 项关键技术进行攻关,形成了系列配套技术,并及时将研究成果在全国各油田推广应用,至 1998 年共在 14 个油田钻成了 165 口水平井。这些井的钻成证实了水平井“少井高产”的突出优点,取得了减少油田勘探、开发费用,缩短油田建设时间,加快资金回收,少占土地和减少环境污染等一系列经济效益和社会效益。

由于水平井在钻井过程中必须经历井斜角从 $0^\circ\sim 90^\circ$,因而水平井与直井钻井工艺有较大的差别。为了确保水平井的钻成并保护好油气层,对水平井的钻井液完井液提出了特殊要求,即必须解决井眼净化、井壁稳定、摩阻控制、防漏堵漏、保护储层等 5 个技术难题。为了使广大钻井液技术人员在今后现场实践中,更好地解决上述难题,我们通过对国内外水平井钻井液完井液有关资料(包括本书全部论文)的综合研究,结合我国实际情况,对如何解决上述 5 个技术难题及应用于各类地层的水平井钻井液完井液类型、配方、处理工艺提出一些看法,以求与同行们共同研讨。

水平井井眼净化

1. 水平井钻井对井眼净化的特殊要求

井眼净化是水平井钻井工程的一个主要组成部分。井眼净化不好会导致摩阻和扭矩增加、卡钻,影响下套管和固井作业的正常进行。水平井钻井过程与直井不同,钻屑上返必须经过井斜角从 $0^\circ\sim 90^\circ$ 各井段,在直井中,岩屑下滑速度(v_s)与岩屑受重力作用方向一致,不存在径向分量(v_{sr})与轴向分量(v_{sa});但随井斜角的增加, v_{sr} 亦随之增加,当井斜角为 90° 时 v_{sr} 增为最大值;而 v_{sa} 则随井斜角增加而降低,当井斜角为 90° 时 v_{sa} 降为零;因此随井斜角的增加,

岩屑在环空中的运移状态和规律与直井有很大差别。根据 Tomren 等人的研究成果,钻屑运移规律按井斜角可分为 3 种类型:

1) 井斜角 $0 \sim \theta_a$ 井段

岩屑在环空中受重力作用而下滑的方向是垂直于水平面,岩屑在井眼当钻井液上返速度稍微大于岩屑在钻井液中的下滑速度,只要不停止循环,岩屑总会慢慢地被带出井筒,不存在钻屑床。

2) 井斜角在 $\theta_a \sim \theta_\beta$ 之间井段

当井斜角增大至 θ_a 时, v_{sa} 增大至足以使岩屑脱离钻井液流,滞留井眼底侧并滑向液流的反向而形成钻屑床;当钻井液停止循环,岩屑床受重力作用而存在下滑趋势。此外,当井斜角达到 $40^\circ \sim 50^\circ$ 时就会很明显地产生“Boycott”效应。该现象是物理学家 A. E. Boycott 在进行血液试验时发现的,当盛有血液的试管倾斜到 $40^\circ \sim 50^\circ$ 时,血球就会很快沉淀。类似的情况亦在斜井井眼中出现。钻井液在斜井段中静止时,在环空高边井壁下立即会出现一层薄轻液,而岩屑则垂直地沉淀在井眼环空的底边并形成岩屑床。其结果会形成横剖面上密度梯度而产生压力不平衡,生成对流趋势,驱使轻液向上,岩屑床向下移动,从而加速沉淀,在动态下会加剧“Boycott”效应。

3) 井斜角大于 $\theta_\beta \sim 90^\circ$ 井段

井斜角超过 θ_β , v_{sa} 将逐渐降至零,岩屑沉淀并聚集在钻杆周围的井眼低侧,即使钻井液停止循环,岩屑床也不再向下滑动。

通过水平井试验架实验、理论计算和现场经验估计的临界井斜角 θ_a 为 $25^\circ \sim 35^\circ$, θ_β 为 $55^\circ \sim 65^\circ$ 。

经以上分析可以看出,水平井钻井过程中,随着井斜角的增大,对井眼净化带来许多不利的影响,特别是井斜角大于 θ_a 的井段与水平段,井眼净化最为复杂的井段是井斜角在 $\theta_a \sim \theta_\beta$ 之间井段。因此说,确保水平井井眼净化所采用的技术措施与直井有很大的差别。

2. 水平井段环空携岩机理^①

1) 岩屑颗粒的受力分析

水平井段环空内岩屑将承受液流拖曳力、上举力、重力、浮力及粒间粘结力等的作用。

拖曳力和上举力:当液流运动时,岩屑颗粒顶部与底部的速度不同,前者为液流的运动速度,后者为颗粒间渗透流体的运动速度,比液流速度要小得多,根据伯努利定理,颗粒上下将产生压力差,此压差便产生方向向上的上举力。

重力:使钻屑沉下井壁的力,力的方向永远指向地心,力的大小取决于钻屑的密度,对大多数地层来说可近似看作常数。

悬浮力:滞缓钻屑下沉速度的力,力的方向与重力相反,力的大小取决于钻井液在实际环空剪切速率下的切应力。

颗粒间离散力:当大量岩屑同时存在且液流和颗粒间存在相对运动时,粒间的绕流流态使颗粒间相互产生影响,颗粒将承受一个与水流方向相垂直的力,此力便是粒间离散力,颗粒靠得越近,离散力越大。

2) 岩屑颗粒的运动形式

岩屑颗粒的运动形式可分为接触质、跃移质、层移质和悬移质 4 部分。

① 本部分由石油勘探开发科学研究院汪海阁编写。

接触质:当岩屑颗粒所受拖曳力增大到一定程度后,颗粒开始向前滑动。在滑动过程中,由于床层表面高低不平,往往会转化为滚动。但在运动中始终与床层保持接触,因此称为接触质。

跃移质:位于成排颗粒前缘的颗粒,当所受合力矩增大到一定程度后,将围绕着后一颗颗粒的接触点而滚动。一方面,当颗粒滚动到某一位置时,压力相应降低,另一方面,作用于颗粒底部表面上的支点压力的作用面积因颗粒的部分上举而扩大,总的结果将使上举力加大。这样的作用在颗粒一开始滚动便产生,无异于在颗粒起动的瞬间增加了一个冲力。受到突然的冲击作用,颗粒就会从床面上跳起来。一般情况下,颗粒运动的轨迹达到最高点时,颗粒的速度已接近当时液流的速度。从这一点起,颗粒转而下降。跳起的颗粒在落到床面时对后边的颗粒有冲击作用。若颗粒跃起较低,在落回床面后不会继续跳动;若颗粒跃起较高,落到床面以后还可以重新跳起。若颗粒自液流中取得很大的动量,则对于床面的冲击不但使自己反弹跳起,而且还使下落点附近的颗粒也跳起前移。

层移质:由于岩屑床是由松散的岩屑颗粒所组成,液流拖曳力不仅作用于床层表面颗粒上,还可以深入到床面以下各层的颗粒。流速小时,表层颗粒以滑动、滚动、跃移的形式进入运动,床面以下颗粒依然在原来的位置上静止不动;流速加大以后,拖曳力增大,表层颗粒已不能保持静止,床层以下的颗粒也开始进入运动。随着液流的不断加强,运动不断向深层发展,从而形成颗粒的成层运动。当大量岩屑以层移质运动时,相邻两层间没有交换现象。

悬移质:随着环空流速的进一步加强,液流中充满大小不同的漩涡。这时岩屑颗粒在床层跃起的过程中,有可能遇到向上的漩涡,并被带入离床面更高的流区中。一般来讲,不但漩涡的向上分速必须超过颗粒的沉速,且漩涡的尺寸也要比岩屑大。才能带走岩屑颗粒。若漩涡较颗粒大得很多,则漩涡可以较长时间地对颗粒发生作用。等到颗粒掉在漩涡以外时,岩屑已进入主流区。由此可见,岩屑的悬浮是靠大尺寸紊动的作用。

3) 水平井环空中的典型流型

在任一给定的岩屑浓度下,当由高到低逐渐降低混合物速度时,可以观察到水平井环空中呈现4种不同的流动物理模型。

均匀悬浮:在最高的流速下,细的和中等的岩屑颗粒完全悬浮。在适当的返速下,若钻井液处于紊流状态且岩屑沉降速度低,就能达到一个均称的浓度分布型,且浓度分布接近于速度分布。

非均称悬浮:当钻井液流速、紊动强度降低时,由于力的减弱使岩屑能够悬浮和沉降,因而浓度分布变形,环空下半部具有较多的大尺寸岩屑。位于底部的岩屑与管壁发生冲击并弹回于水流中。

移动床模型:在某一速度下,全部岩屑冲击管壁,有的岩屑反弹于液流中。岩屑堆积于管底,形成连续的移动床。此时上部液体中岩屑颗粒很少。对于存在粒径分选的岩屑,床层是由沉速最快的岩屑组成,具有中等沉速的岩屑处于非均称悬浮中,最低沉速的岩屑处于均称悬浮中。

固定岩屑床:当流速进一步降低时,床层最低部的颗粒几乎停止运动,使床层增厚,由于最上层岩屑相互翻滚的原因使床层发生运动,形成淤积,其结果使液流有效断面减小。较小的岩屑在床层上仍处于非均称悬浮的模型。

3. 评价井眼净化能力的方法

在井眼净化上,水平井不同于直井,评价水平井净化能力的方法根据具体条件和需要可采

用不同方法,下面介绍几种国内外常采用的方法:

(1)测定返出钻井液中的钻屑浓度。钻井过程中,单位时间内从环空中返出的钻井液中所含的岩屑浓度愈大,则表示携带出的岩屑愈多,留在环空内的岩屑愈少,说明井眼净化好。有些学者采用清洁率来表示,清洁率指每分钟能清除出来的岩屑公斤数。

(2)环空中岩屑浓度。环空中岩屑浓度愈大,说明未带出而留在环空中岩屑愈多,表示井眼净化差。

(3)观测岩屑床形成的临界流速或称为最低流速。采用此方法基于两个原因,其一是岩屑床的形成是水平井净化问题的核心,直接影响水平井钻井的成败;其二是环空返速是水平井净化的关键影响因素。因而把两者结合起来作为净化程度的评价方法和指标较为合适,通过它可以获得各种因素对净化效果影响的数据。

(4)观测加重钻井液垂沉系数。加重钻井液重心位移表征上下密度差程度,此值愈大,说明垂沉愈严重,重心位移随时间而发生变化。垂沉系数是加重钻井液重心位移对时间的积分值,当不发生垂沉时,此值为零。

4. 影响水平井井眼净化的因素

国内外的学者使用净化试验模拟装置进行了大量试验,得出了下述各种因素对井眼净化影响的规律。

1)井斜角

井斜角是影响井眼净化主要因素之一,它是不可改变的因素,环空岩屑浓度或临界流速随井斜角的增加而变大,而清洁率则随之下降。井眼净化最困难的井段一般处于井斜角在 $\theta_a \sim \theta_p$ 之间井段。

2)环空返速

环空返速是影响井眼净化主要因素之一,其大小直接影响环空岩屑的运移方式、状态和环空岩屑浓度。在任何井斜角下,无论使用层流还是紊流,提高环空返速,环空岩屑浓度降低,井眼净化状况得以改善;在成床的条件下,随着环空返速的增加,岩屑床厚度降低,当环空返速足够大时,岩屑床被破坏,井眼下侧不形成明显的岩屑床。

在特定的井斜角和钻井液流变参数下,存在一个形成岩屑床的临界环空返速,当环空返速大于此值时,不会形成钻屑床。国内外学者大量实验证实,当井斜角处于 $30^\circ \sim 90^\circ$ 时,此临界返速为 $0.79 \sim 1.10 \text{m/s}$ 。

对于水平井钻井来说,环空返速存在一个最佳范围。环空返速过低影响井眼净化,造成摩擦过大而引起卡钻等井下复杂情况;过高则钻井液流会对井壁产生冲蚀,造成井径扩大,反而引起环空返速下降,钻屑床厚度增加,影响井眼净化效果。特别对于松散砂层和对冲蚀极为敏感的稠油砂层,过高的钻头水力参数能冲蚀井眼,对井眼净化带来不良影响。

3)环空流型

环空倾角较低时($0^\circ \sim 45^\circ$),层流比紊流携屑效果好;在大斜度和水平井段($55^\circ \sim 90^\circ$),环空钻井液的流态对井眼净化影响较大,当流态从层流过渡到紊流,岩屑床面积急剧下降,紊流比层流携屑效果好;井斜角在中间范围($45^\circ \sim 55^\circ$),两种流态的携屑效果基本相同。但在实际钻井过程中,由于受各种条件的限制,无法在环空形成紊流,此时可通过调整钻井液流变性能,改变层流速度剖面的平板程度来取代紊流,使钻井液在环空处于平板型层流,从而亦可达到改善井眼净化的目的。

4) 钻井液流变性能

钻井液流变性能是影响井眼净化的极为重要的因素,水平井钻井过程中为了确保井眼净化,必须选用合理的钻井液流变参数。

层流状态下,钻井液流速较低时,提高钻井液的动切力和动塑比,可降低环空钻屑浓度,从而获得较好的携岩效果;井斜角较小时,动切力的作用是明显的;但随着井斜角增大,动切力的作用减弱,在大斜度和水平井段,动切力的作用变小甚至可以忽略,但动塑比对携岩的影响仍较大,必须尽可能使用高动塑比钻井液。

紊流状态下,在整个环空倾角范围内,钻井液的携岩能力不受其流变性能(动切力和动塑比)的影响。

环空钻井液无论处于层流状态还是紊流状态,都必须保持一定的初切力,通常使用初切力作为携屑能力的指标较好;但初、终切力之间的差值不宜过大,过高的触变性不利于携屑,尤其在低返速下,会加剧岩屑床的形成并增加清除的难度。

5) 钻井液密度

随钻井液密度的提高,有利于钻屑的携带,改善井眼净化状况,并降低钻屑床的厚度。

6) 钻柱尺寸

当井身结构已确定,钻具的尺寸直接影响钻井液环空返速,随着钻杆尺寸的增大,环空返速增加,有利于携屑。因此钻进水平井时,如条件许可,应尽可能使用大尺寸钻柱。

7) 转速

转动钻柱有利于井眼的净化,因为对于大斜度井段,岩屑在环空下侧形成钻屑床,钻柱的旋转,对沉积的岩屑起搅动作用,有利于床面岩屑的离去;转动钻柱可以限制钻柱的偏心效应,从而改善井眼净化;对于具有触变性的钻井液,提高转速可防止钻井液在井壁周围形成不流动层,从而提高井眼净化;此外,钻柱除了自转外,还围绕井眼周界作圆周运动,因而有利于岩屑的携带。

8) 钻柱的偏心度

当井斜角较小时,钻柱的偏心度对岩屑运移所产生的影响很小;但随着井斜角的增大,钻柱的偏心度对环空岩屑的影响较大;环空岩屑浓度随钻柱偏心度的增大而增大。

9) 钻井速度和岩屑尺寸

在通常的钻速范围内,钻井速度对岩屑床厚度影响较小。但当钻速过高时,会造成环空钻屑浓度过大,岩屑床厚度增加。岩屑尺寸大小亦会对井眼净化效果带来影响。

5. 实现水平井净化的技术措施

水平井的井眼清洗在现场经常采用水力清洗和机械清洗相结合的措施来解决。机械清洗主要是顶部驱动和加强固控。水力清洗指采用适当的水力参数和钻井液性能来提高清洗效果。实现水平井净化的技术措施可归纳为以下几个方面:

(1) 提高环空返速,并采用严格的强化与循环有关的程序,在钻进和起下钻过程中不停止循环,在接单根之前循环到岩屑从井内返出为止。如果实际情况中由于泵排量受到限制,那么应使用钻井泵排量的上限,同时增加循环时间。当钻速高时,即使在大排量下,环空内岩屑浓度仍较大,此时应在钻进一定进尺后停钻循环一段时间,以彻底清洗井内的岩屑。

(2) 选用合理流型与钻井液流变参数。井斜角较小井段(小于 45°),层流能获得最佳的井眼清洗效果,尽可能提高钻井液的动切力和动塑比,并可泵入高粘度段塞来清除岩屑。大斜度井段中,使用紊流的清除效果更高。由于紊流只取决于流体的动量特性,而与钻井液的流变性

能无关,因而应使用低粘度钻井液。但钻进大斜度井段时,由于受各种条件的限制,钻井液在环空无法达到紊流,可通过提高钻井液动塑比,使其在环空形成平板型层流来提高岩屑清洗效果;采用高粘度清扫液在此井段只能对液流中岩屑起作用,而对清除岩屑床不起作用,但可通过间断注入低粘剂,促成局部紊流,来清扫岩屑床。

必须保持一定低剪切速率下的钻井液粘度(Φ_3 和 Φ_6 读数),以提高悬浮钻屑能力及防止钻屑床的形成。严格控制初、终切力差值,力求避免钻井液触变性过大而带来的各种不利的影响,避免起下钻过程产生过高的抽吸和激动压力。

(3)改变下部钻具组合,增大钻杆直径,减少环空体积来提高环空返速。

(4)适当增加钻井液密度,改善井眼清洗效果。

(5)转动钻具或上下大范围活动;除接单根外,不允许钻柱在井内静止,坚持短起下钻。

(6)使用钻杆扶正器,使钻具居中,减少钻杆偏心度对携岩的影响。

(7)泵硬果壳段塞。有规律地泵入介质和细粒硬果壳段塞可以提高井眼净化和岩屑输送效果。

(8)控制钻进速度,先钻小井眼再扩眼以减少每米进尺岩石切削量。

(9)采用高转速金刚石钻头来减少岩屑体积。

(10)采用顶部驱动系统或动力水龙头系统进行倒划眼。

(11)采用带喷嘴的钻井工具接头。

(12)检测返出钻屑量,监控岩屑床是否生成,及时采取措施。

(13)使用井眼净化计算机软件(MTV 模式)。当井眼尺寸、钻井液性能、钻具结构、钻具偏心度及转速等因素确定后,可模拟出处在不同井斜角时,满足井眼清洁并保持环空钻屑处于悬浮状态条件下,钻井液在环空的最低上返速度。

水平井井壁稳定

井壁稳定是钻井工程中最常见的井下复杂情况之一。发生井壁不稳定的原因可归纳为力学因素与物理化学因素,但最终均归结为井壁岩石所受的应力超过其自身强度造成岩石发生剪切破坏。钻进水平井过程中,由于井斜角和方位角的变化对井壁不稳定带来不利的影响,因而必须采取相应的技术措施才能确保水平井的安全钻进。上述这些因素对地层坍塌压力的影响及与直井相同的影响水平井井壁稳定因素和技术对策详见《井壁稳定技术新进展》一书,本文仅研讨影响水平井井壁稳定与直井不相同的特殊因素和技术对策。

井眼钻开前,地下岩石在上覆地层压力、水平地应力及地层孔隙压力的作用下,保持应力平衡状态;井眼被钻开后,井筒内的钻井液柱压力取代了所钻岩石对井壁的支撑,引起井壁周围的应力重新分布;当井筒中的液柱压力小于地层坍塌压力时,井壁周围的岩石所受的应力就会超过岩石本身的强度,造成井壁四周岩石发生剪切破坏。

地层坍塌压力即是保持井壁稳定所需最低井筒内的液柱压力。地层坍塌压力与下述因素有关:地应力大小、地应力的不均匀程度、上覆地层压力与地应力的关系、孔隙压力、岩石强度、地层倾角、地层渗透性、地层破碎程度、井筒的井斜角和方位角、钻井液性能等。

1. 井斜角和方位角对井壁稳定的影响

1) 井斜角和方位角对坍塌压力和破裂压力的影响

井壁岩石所受的地应力由两部分组成:重力与构造应力。当地层没有受构造运动作用,其

水平地应力是均匀的;而当地层受强烈构造运动作用,水平地应力呈现不均匀性,其大小与上覆压力之间的关系发生变化,引起坍塌压力与破裂压力的变化。水平井钻井过程中,其井斜角和方位角均会随所钻深度而发生变化,而井斜角和方位角对坍塌压力和破裂压力的影响又与井壁岩石所受的上覆压力所产生的垂直应力(σ_v)、最大水平地应力(σ_H)、最小水平地应力(σ_h)的大小及相互关系有关,还与地层是否存在弱面有关。根据石油大学和西南石油学院所进行的试验结果及国外所进行的研究得出以下认识:

(1)当 $\sigma_v > \sigma_H = \sigma_h$ 时(所钻地层基本上没受构造运动的影响)。

坍塌压力随着井斜角的增大而增加,而地层破裂压力则随井斜角增大而下降。这说明随着井斜角增大,保持井壁稳定所需的井筒内的液柱压力的范围在缩小,钻井过程中越容易发生井塌。但地层坍塌压力和破裂压力与井筒的方位角无关。

(2)当 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ 时(处在正断层附近的地层)。

沿最大水平应力方向钻进,坍塌压力随着井斜角的增大而增加,而地层破裂压力则随井斜角增大而下降。这说明随着井斜角增大,保持井壁稳定所需的井筒内的液柱压力的范围在缩小,钻井过程中越容易发生井塌。而沿最小水平应力方向钻进,随井斜角增大,坍塌压力增加,破裂压力增加;但当在井斜角大于 50° ,则地层破裂压力反而下降。当各种条件均相同时,坍塌压力值比 $\sigma_v > \sigma_H = \sigma_h$ 时高,而破裂压力则比 $\sigma_v > \sigma_H = \sigma_h$ 时低。这说明随着地应力不均匀程度的增加,井壁越不稳定。当各种条件均相同时,随井筒方位角的增大,坍塌压力值降低,破裂压力增高。故在正断层附近钻水平井,应向最小地应力方向钻进,井壁更容易稳定。

(3)当 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ 时(处在平推断层附近的地层)。

坍塌压力随着井斜角的增大而减小,而地层破裂压力则随井斜角增大而增加,这意味着随井斜角增大,保持井壁稳定所需的井筒内的液柱压力的范围在增大,钻井过程中井塌不会更为严重。在平推断层附近钻水平井,随井眼方位角增大,坍塌压力增大,破裂压力亦增大,但方位角大于 50° ,破裂压力稍有下降,但仍高于向最大水平应力方向钻进时的破裂压力值。综合分析,可认为在平推断层附近钻水平井,沿最大水平地应力方向钻进,井眼不易坍塌,但易被压裂;沿最小水平地应力方向钻进,井眼易坍塌,但不易被压裂。

(4)当 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ 时(处在逆断层附近的地层)。

如井眼沿最大水平应力方向钻进,随井斜角增大,坍塌压力下降,破裂压力增加,当在井斜角大于 40° 则地层破裂压力大幅度下降;如沿最小水平应力方向钻进,随井斜角增大,坍塌压力稍增,但破裂压力大幅度下降,保持井壁稳定所需的井筒内的液柱压力的范围急剧缩小,钻井过程中极易发生井塌。因此,当在逆断层附近钻水平井,井斜角增大,井壁更稳定,但是向靠近最小水平应力方向钻进,大斜度井段易漏失,应向最大地应力方向钻进,这正好与在正断层附近钻水平井稳定井壁规律相反。

(5)井斜角对存在弱面地层的坍塌压力的影响。

Aadnoy 的模拟实验结果表明,存在弱面的地层岩石的屈服强度为层面方向的函数,弱面使岩石抗剪强度几乎降低两倍。钻水平井时,如向最大水平应力方向倾斜,则弱面起作用,对坍塌压力影响最大的井斜角为 $10^\circ \sim 40^\circ$,此时岩石易沿层面发生破坏,井眼容易发生坍塌,但沿最小水平地应力方向倾斜,地层趋于稳定。

2)井斜角和方位角对井壁不稳定物理化学因素的影响

钻井过程中,在钻井液与地层孔隙压力之间的压差、化学势差、地层毛细管力等力的驱动下,钻井液滤液进入地层,引起地层中的粘土矿物发生水化膨胀,形成水化应力,改变了井眼周

围地层的孔隙压力与应力分布,引起岩石强度的降低,导致地层坍塌压力的增高,加剧了地层的坍塌趋势;此外,由于地层中所含的各种粘土矿物的水化膨胀特性不同,蒙皂石>伊蒙间层>伊利石>高岭石>绿泥石,因而当钻井液滤液进入地层后,地层中所含的各种粘土矿物颗粒所产生的水化应力不同,如钻井液滤液的抑制性能较差,则颗粒之间所形成的应力差值就有可能大于颗粒之间的联结力,使岩石产生裂纹,造成更多的钻井液滤液进入地层,引起井塌。钻水平井时,随着井斜角的增加,井眼倾斜通过坍塌地层,因而易塌地层裸露在钻井液中的面积增大,浸泡时间增长,由流阻引起的附加压差变大,使侵入坍塌层的钻井液滤液数量增加,由此而引起对坍塌地层的物理化学作用与直井相比大大加剧,从而造成井壁不稳定的可能性增加。

2. 钻水平井时稳定井壁的技术措施

1) 选用合理的钻井液密度

为了保持井壁稳定,钻井液密度必须大于地层坍塌压力而低于地层破裂压力。但确定上述压力值时必须考虑所钻达地层实际井斜角和方位角的影响,还必须考虑所采用的钻井液滤液对地层水化应力的影响。

2) 优化井身剖面设计

依据所钻地层地应力的不均匀程度及上覆地层压力与地应力的关系,优选所钻井的方位。在正断层附近钻水平井,应尽可能向最小地应力方向钻进;在平推断层附近钻水平井,应沿最大水平地应力方向钻进;在逆断层附近钻水平井,应向最大地应力方向钻进。

为了缩短坍塌地层的浸泡时间,如坍塌地层正好处于大斜度井段,则尽量选用较小曲率半径的井身剖面。

3) 依据地层组构特性优选钻井液类型与配方

水平井钻进时,为了保持井壁稳定,选用钻井液类型和配方时,除了考虑地层的组构特性外,还必须考虑到坍塌层处于斜井段时被钻井液浸泡时间较直井长。因而对于相同类别的地层,所选的钻井液的抑制性和封堵性均应比直井所选用的钻井液强,HTHPFL与渗透滤失量应更低,泥饼质量更高。此外,由于井斜角的影响,封堵剂易在下井壁堆积,故必须增加封堵剂的加量才能保证对层理裂隙发育地层的有效封堵。

对于松散砂岩储层,为了防止其井塌,除抑制地层中粘土水化外,还必须采用强封堵材料在近井筒形成具有一定强度的暂堵带来加固井壁,而此带必须在完井投产时很容易被解堵液解堵。

4) 确定合理的环空返速,减少对井壁的冲蚀

在大斜度井段钻进时,为了确保井眼的净化,通常采用紊流钻进。尽管紊流有利于井眼净化,但紊流易冲蚀井壁,如此冲蚀力过大,易引起井塌,造成井径扩大,环空返速降低,又不利于井眼净化。因而必须优选合理的环空返速,既保证井眼净化,又不冲蚀井壁。

水平井的摩阻控制

1. 水平井摩阻控制的特殊性

钻直井时,如钻具居中,起下钻具的提升拉力仅为钻具重量减去钻具在钻井液中的自身浮力;旋转钻具时,其扭矩仅为转动钻具、钻头破碎地层的阻力及与钻井液的摩擦力。实际钻井中,井眼不可能绝对垂直,总有一定的弯度,钻具靠井壁,因而总存在一定的阻力和附加扭矩,但因井斜角小,接触面积小,故此值不大。但钻水平井时,井斜角从 0° 增至 90° ,钻具在重力的

作用下,总是靠着井壁,钻具与井壁的接触面积比直井大幅度增加,因而起下钻具的摩擦阻力和旋转钻具的扭矩与直井相比就会大幅度增加,其值随井斜角的增大而增加,随方位角的变化而增大。因而水平井钻井过程中的卡钻可能性较直井大得多。

2. 水平井钻进过程中影响摩阻的因素

水平井摩阻大小主要取决于压差,钻柱与井壁(或套管)的接触面积,岩屑床厚度,井眼清洗状况,钻井液润滑性,泥饼的摩擦系数及厚度、地层特性等。其中压差、地层特性等因素对摩阻的影响与直井相同,下面着重研讨影响水平井摩阻的特殊因素。

1) 井身剖面

井身剖面对水平井钻井过程中的摩擦阻力和扭矩有较大的影响。摩擦阻力和扭矩与井眼轨迹密切相关,随造斜率与狗腿度的增加而增大,荷兰 Unocal 公司在分析对比定向侧钻水平井的井眼轨迹设计方案时得出:与低造斜率相比,中造斜率扭矩和摩阻力均较低,高造斜率扭矩较大。Montigny 采用井下钻柱模拟装置及计算机模式进行井眼轨迹和钻具组合的定量分析得出:在造斜率高的井底($30^{\circ}/30\text{m}$),拉力较小,但在造斜率低的井眼上部($1.5^{\circ}/30\text{m}$),拉力最大;稳斜段如井斜适当,则可使拉力与扭矩降低;稳斜段稳斜角愈大,钻具与井壁接触面就愈大,阻力增大;如果井眼轨迹允许只有一个造斜点,那么自造斜点到靶位造斜率恒定不变的轨迹所产生的扭矩和阻力最小。

2) 钻柱结构

钻柱结构对水平井的摩阻影响很大,随着井斜角的增大,支撑钻柱重量乘以井斜角的余弦为钻头的钻压,因而随着井斜角的增大,钻柱的阻力增加,当井斜超过 60° ,此值增加很快,井斜角为 75° ,总支撑重量 60% 是有效的,当井斜角增至 85° 时仅 0.1% 有效,钻压无法加至钻头上。此外,钻柱的摩擦阻力还与钻具的接触面积有关,因而钻具的尺寸及在井中所处的位置也影响钻柱的摩擦阻力和扭矩,如钻铤放在钻头附近,其外径大,与井壁接触面积就会增大。

3) 钻井液润滑性能

钻井液的润滑性能是影响钻柱的摩擦阻力和扭矩的主要因素之一。降低钻柱与套管的摩擦系数和钻柱与井壁上钻井液所形成泥饼的摩擦系数就可以大大降低钻柱的摩擦阻力和扭矩。

4) 钻井液滤失量和泥饼质量

钻柱的摩擦阻力和扭矩与钻柱与井壁的接触面积有关,如钻井液固相含量高,HTHPFL 大,泥饼厚,则钻柱在斜井段和水平井段嵌入泥饼越深,接触面积就愈大,摩阻力增高。

5) 井眼净化

水平井钻进过程中如井眼净化不好,则在斜井段和水平井段很容易形成岩屑床,从而增大了钻柱与井壁的接触面积,造成摩阻力的增加。

6) 固控

如水平井钻井过程中固控不好,钻井液中无用固相增多,一方面钻井液密度增高,作用在地层的压差增大;另一方面增大泥饼的摩擦系数。这一切均增加钻柱的摩阻力。

7) 井身结构

井身结构影响钻柱与套管和井壁的接触面积,而且钻柱与套管的摩擦系数和钻柱与井壁的摩擦系数不同,因而井身结构影响水平井的摩阻。

3. 降低水平井摩阻的技术措施

从以上分析结果来看,水平井钻井过程中,大部分扭矩增大和阻卡问题均是由于井眼清洁差而形成的岩屑床、井壁不稳定、键槽和压差过大等因素所引起的,只有当这些复杂情况被排