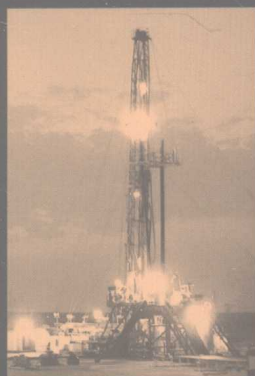


Underbalanced
Drilling

欠平衡钻井

基础理论与实践



Basic Theory

and Practice of
Underbalanced Drilling

■ 杨 虎 王利国◎著

石油工业出版社

欠平衡钻井基础理论与实践

杨 虎 王利国 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要讲述了欠平衡钻井地质适应性评价方法,各种流体(气体、雾、泡沫、充气液及其他低密度流体)的相关理论、配套技术及专用设备,欠平衡钻井井筒气液两相流的流动规律和数学模型,欠平衡钻井井底负压的影响因素和设计方法,井筒钻井液循环温度和压力的耦合模型,高温高压钻井液循环当量密度的计算模型,钻井工况(气侵和岩屑量)对井底压力的影响规律,欠平衡钻井与水平井注气方式和关键技术,欠平衡钻水平羽状分支井技术实践等。本书注重理论与实践相结合,在系统介绍欠平衡钻井基本概念和理论方法的同时,给出了大量的工程实例,方便广大读者理解相关内容。

本书适合从事油气勘探工程、钻采工程、油气开发工程、应用化学、探矿工程的技术人员及相关科研院所的科研人员、高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

欠平衡钻井基础理论与实践/杨虎,王利国著.

北京:石油工业出版社,2009.1

ISBN 978-7-5021-6918-3

I. 欠…

II. ①杨… ②王

III. 油气钻井-研究

IV. TE242.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 192060 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)64523562 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京晨旭印刷厂

2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:19.5

字数:462 千字 印数:1—2000 册

定价:90.00 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

目前,世界石油工业面临着严峻的形势,远景性的石油资源严重匮乏,勘探开发难度日益增大,新探明储量的增加速度远远小于可动用储量的减少速度。从世界范围的勘探形势来看,发现巨型大型油田的难度越来越大。因此,人们将能源发展重点放在中、小型油田、复杂地质条件和复杂地表条件下的油田、非常规油气资源的勘探开发,以及油田的改造和挖潜上,这必然导致勘探开发难度和成本日益增加。

油气井是人类勘探开发地下油气资源的主要信息和物质输送通道。油气井工程就是围绕油气井的设计、施工、测量、生产与维护而进行的资金和技术密集型工程。世界范围内,油气钻井的工程费用通常占勘探总成本的 55% ~ 80%。它不仅是贯穿油气勘探开发全过程的关键工程,而且对于其他非常规能源的开发和地球科学研究均具有重要的作用。因此,油气钻井新技术的研究和推广,对于提高勘探效率、增加油气生产能力和节约勘探开发成本具有十分重要的意义。

欠平衡钻井技术始于 20 世纪 80 年代末,迎合了目前世界油气勘探开发的形势,随后迅速风靡世界。据美国能源部预测,未来 10 年欠平衡钻井技术的应用仍将稳步增长。主要原因是欠平衡钻井自身的技术特点解决了当前油气勘探开发的部分难题。由于其明显的技术优势(机械钻速快、储层保护效果明显等),加上不断完善的配套设备和技术(井口旋转控制系统、高压注气系统、地面分离系统、监测仪表系统以及完井、测井技术和软件技术等),使得欠平衡钻井在美国、加拿大和欧洲被广泛应用。中国紧随世界欠平衡钻井的发展潮流,先后在新疆、四川、辽河、华北、大庆、胜利等油田进行了相关的技术研究和试验,在钻井流体、地面设备、配套工艺等方面取得了迅速的发展。

欠平衡钻井是指有意识地让井筒压力低于地层压力,当钻遇渗透性地层时,地层流体会不断流入井筒并循环到地面,人为地加以有效控制的钻井技术。有时也被称为“边喷边钻”。欠平衡钻井的概念、原理、设备、技术等方面同常规钻井液钻井存在很大区别。因此,有必要就欠平衡钻井进行系统的研究和论述。

作者综合应用力学、数学、物理化学、机械等基础科学的理论和方法,采用多种试验手段,在借鉴国内外学者研究成果和作者多年欠平衡钻井实践的基础上,综合研究了欠平衡钻井系列工作流体的地层适应性评价方法、现场配套技术、携岩理论、多相管流理论、工程参数设计方法、井底负压约束理论、井筒温度场与压力场的耦合理论、井底压力监控方法、欠平衡钻水平井实现方法等编写而成本书,以此为欠平衡钻井的优化设计和作业控制提供科学依据。

由于欠平衡钻井在某些方面存在一定的复杂性,所以存在诸多学术争论,本书提出的某些理论和方法与人们的实践或期望还存在一些差距。例如,各种流体的携岩机理和能力极限需

要更多的试验支撑;由于环空气、液、固多相管流理论和数学处理方法的局限,模拟结果与实际数据总会存在一定误差;本书将井筒压力与温度进行耦合处理,难度很大,虽然理论上属于创新,但数学方法是一种摸索,值得进一步研究;另外,本书提出的实现欠平衡钻水平井的部分环空注气方式未投入现场实践,许多技术环节需要改进和验证。

自国家“九五”以来,两位作者在欠平衡钻井理论研究与工程应用方面做了一些具体工作,在中国石油大学(北京)攻读硕士和博士学位期间,进行欠平衡钻井、钻井流体及储层保护技术研究,把欠平衡钻井理论和实践充分结合,为本书的完成创造了很好的基础。两位作者将这些研究工作和现场经验加以总结成书,奉献给读者,并期望该书能对欠平衡钻井的深入研究和应用产生一点抛砖引玉的效果。

本书包括 14 章内容,大致分为 4 部分。第一部分从欠平衡钻井地质适应性评价方法(第 2 章)入手,优选出适合特定地层的工作流体;然后就各种流体(气体、雾、泡沫、充气液及其他低密度流体)的相关理论、配套技术(第 3~6 章)及专用设备(第 7 章)进行详细阐述。第二部分主要针对欠平衡钻井井筒气液两相流的流动规律和数学模型(第 8 章)进行研究,在此基础上提出欠平衡钻井井底负压的影响因素和设计方法(第 9 章)。第三部分主要建立了井筒钻井液循环温度和压力的耦合模型(第 10 章),在此基础上研究欠平衡钻井井筒钻井液密度、流变性随温度和压力的变化规律,建立钻井液循环当量密度的计算模型(第 11 章),分析钻井工况(气侵和岩屑量)对井底压力的影响规律(第 12 章),以此达到井底压力的精确控制,实现控压钻井。第四部分针对欠平衡钻井与水平井的技术结合,重点研究了各种环空注气方式和关键技术(第 13 章),并将欠平衡钻水平羽状分支井技术首次应用于煤层气开发实践(第 14 章)。本书第 1~5 章、8~9 章、13~14 章由杨虎撰写;第 6~7 章、10~12 章由王利国撰写。

本书涉及的部分研究成果是国家 863 项目及中国石油天然气集团公司、美国 AACI 能源公司、新疆油田公司和新疆石油管理局等石油企业重点科研项目的资助下完成的。因此,在本书出版之际,向国家 863 项目部门和有关企业领导、同事表示衷心感谢。同时,在本书的撰写过程中,得到了鄢捷年教授、樊世忠教授、张和茂先生的大力帮助,在此深表谢意!

由于作者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恭请广大读者批评指正!

杨 虎 王利国

2008 年 8 月于北京

作者简介

杨虎:男,博士,高级工程师。1974年12月生于新疆克拉玛依市;1997年7月毕业于石油大学(华东)石油工程专业(钻井);1997~2002年在中国石油天然气集团公司新疆石油管理局钻井工艺研究院从事欠平衡钻井、水平井钻井科研及管理工作;2004年获中国石油大学(北京)油气井工程硕士学位;2007年获中国石油大学(北京)工学博士学位,荣获中国石油大学(北京)优秀博士毕业生;2008年被聘为中国石油天然气股份有限公司新疆油田分公司勘探开发研究院高级工程师,钻井专业科研负责人;2008年入选新疆维吾尔自治区高层次人才库。

10多年来,作者主要从事水平分支井、欠平衡钻井、煤层气钻井、钻(完)井液及油气储层保护等技术的研究。先后完成国家级、部级和局级重点科研项目12项,主要科研成果荣获中国石油天然气集团公司科技进步奖2项;新疆维吾尔自治区科技进步奖1项;新疆石油管理局科技成果奖3项;新疆油田分公司科技成果奖1项。先后在国内外学术期刊和会议上发表学术论文50余篇。

目 录

1 绪论	(1)
1.1 欠平衡钻井的发展态势	(1)
1.2 欠平衡钻井的基本概念	(2)
1.3 欠平衡钻井的技术优势	(2)
1.4 欠平衡钻井的技术局限	(4)
2 欠平衡钻井地层适应性评价方法	(7)
2.1 引言	(7)
2.2 地层适应性评价方法与指标	(9)
2.3 欠平衡钻井井眼稳定性分析	(16)
2.4 欠平衡钻井地层适应性评价实例	(29)
3 气体雾化钻井理论与配套技术	(34)
3.1 空气雾化钻井定义及特点	(34)
3.2 空气钻井循环压力计算	(35)
3.3 空气钻井井眼净化理论	(39)
3.4 空气钻井流程与设备	(46)
3.5 空气钻井的操作规程	(51)
3.6 空气钻井的局限性	(54)
3.7 氮气钻井配套技术	(56)
3.8 天然气钻井配套技术	(58)
3.9 雾化钻井配套技术	(60)
4 泡沫钻井基础理论与配套技术	(67)
4.1 泡沫流体功能和优点	(68)
4.2 泡沫流体的组成	(69)
4.3 泡沫流体的基本性能	(75)
4.4 泡沫流体的稳定机理	(78)
4.5 泡沫流体的流变模型	(88)
4.6 泡沫的稳定流动模型	(90)
4.7 泡沫流体的携岩极限	(93)
5 充气液钻井基础理论与配套技术	(98)
5.1 充气液钻井的技术特点	(98)
5.2 充气液钻井的注气方式	(99)
5.3 充气钻井液的两相流体	(102)

5.4	气液注入流量设计方法	(104)
6	其他低密度钻井流体技术	(110)
6.1	微泡沫钻井液	(111)
6.2	无固相清洁盐水钻井液	(120)
6.3	空心玻璃微珠	(130)
7	欠平衡钻井专用设备	(134)
7.1	设备组成及井场布置	(134)
7.2	地面专用设备	(135)
7.3	井下专用设备	(152)
7.4	其他专用设备	(158)
8	欠平衡钻井气液两相流动规律与数学模型	(163)
8.1	气液两相流模型基本术语与流型描述	(163)
8.2	欠平衡钻井主要流动型态判别模型	(169)
8.3	欠平衡钻井气液两相流稳定流动数学模型	(172)
8.4	气液两相流钻头水力模型	(180)
8.5	气液两相稳定流动模型数值解法	(181)
8.6	欠平衡钻井气液两相流计算实例	(185)
9	欠平衡钻井井底合理负压设计方法	(188)
9.1	欠平衡钻井流体当量密度的设计流程	(188)
9.2	水平井段长度与井底负压的数学关系	(190)
9.3	欠平衡钻井避免井壁坍塌的负压模型	(195)
9.4	欠平衡钻井避免储层应力敏感损害的负压模型	(200)
9.5	欠平衡钻井井底合理负压设计实例	(207)
10	欠平衡钻井液井筒温度场模拟与分析	(211)
10.1	钻井液井筒温度场的物理模型	(211)
10.2	井筒内流体和地层温度场控制方程	(212)
10.3	井筒温度场控制方程的求解	(215)
10.4	井筒温度的影响因素分析	(218)
10.5	钻井液井筒温度场实例验证	(223)
11	欠平衡钻井液环空当量密度预测方法	(226)
11.1	国内外钻井液密度预测模型	(226)
11.2	高温高压钻井液密度综合预测模型	(230)
11.3	钻井液的常密度温度分布规律	(234)
11.4	钻井液当量静态密度(<i>ESD</i>)计算模型	(235)
11.5	钻井液当量循环密度(<i>ECD</i>)预测模型	(241)
11.6	井筒钻井液流变性预测模型	(241)
11.7	钻井液当量循环密度预测模型实例研究	(245)

12 欠平衡钻井井底压力的工况影响与控制方法	(252)
12.1 环空气侵对井底压力的影响	(252)
12.2 环空岩屑对井底压力的影响	(256)
12.3 欠平衡钻井井底压力的监控方法	(260)
13 欠平衡钻水平井注气方式及关键技术	(267)
13.1 常规定向随钻测量技术的适用性分析	(267)
13.2 钻柱注气钻水平井随钻轨迹测量技术	(269)
13.3 欠平衡钻水平井的环空注气技术	(275)
14 欠平衡钻水平羽状分支井技术实践	(287)
14.1 DNP02 欠平衡钻水平羽状分支井工程方案	(287)
14.2 DNP02 井井底负压及当量密度设计	(291)
14.3 DNP02 井钻井流体水力参数设计	(292)
14.4 DNP02 欠平衡钻水平井应用概况	(294)
参考文献	(299)

1 绪 论

欠平衡钻井技术的研究和应用,始于20世纪80年代末,随后迅速风靡世界。自世界石油工业发展水平井技术以来,还没有一项钻井新技术具有如此大的魅力。而且据美国能源部与美国莫尔工程公司预测,未来10年,欠平衡钻井技术的应用仍将稳步增长。欠平衡钻井能有如此的大好发展形势,究其原因,主要有两个方面:一是世界油气工业勘探开发形势迫切需要油气勘探开发新技术,二是欠平衡钻井技术自身的技术经济特点,很好地适应了当前的形势。

1.1 欠平衡钻井的发展态势

首先,目前世界石油工业面临着严峻的形势,主要体现在两个方面:一是远景性的石油资源严重匮乏,勘探开发难度日益增大,新探明储量的增加速度远远小于可动用储量的减少速度。从世界范围的勘探形势来看,发现巨型大型油田的可能性越来越小,作为目前工业能源的石油已明显不能保证未来几十年后工业发展的需要,但能够替代石油作为今后工业主要能源的新能源仍然未能发现,所以人们仍将能源发展的重点放在勘探开发更多的石油和天然气上。而目前石油上游领域的重点则放在中、小型油田、复杂地质条件和地表条件下的油田、非常规油气资源的勘探开发上,以及中、后期油田的改造和挖潜上,这种形势和任务必然导致勘探开发的难度日益增大,成本日益增加。

其次,世界目前石油市场价格体系的失调,低成本的OPEC石油与高成本的非OPEC石油在获利方面有巨大差别,这种现象导致了油价体系的失调,世界性的低油价给石油工业上游领域的发展带来了极大不利。但由于中东原油产量还远不能满足整个世界市场的需求,从而必然有相当一部分非中东原油进入世界市场参与竞争。而能否进入世界石油市场参与竞争,其关键因素就是石油的生产成本。因此,降低石油开发成本就是目前石油工业上游领域的重要任务之一。

新形势下油气勘探开发的特点是:勘探开发的难度越来越大,投入的成本越来越高。这种勘探开发的新形势产生了两条基本要求: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 $1/3 \sim 2/3$ 。因此,提高钻井技术,降低钻井成本则成了第一位应考虑的问题。从另一方面看,世界的特殊油气藏资源相当丰富,尤其是低压低渗油田。就拿我国来说,其储量占总探明储量的 $1/3$,同时,不仅有大量的原生性低压、低渗油气资源,而且相当部分开发中后期油田由于压力递减而进入低压范畴。而欠平衡钻井本身的技术特点很适合开发这类油田。因此,欠平衡钻井有着巨大的市场,其前景相当可观,这也是促进欠平衡钻井的诞生与发展的客观动力。

这种新的形势迫使石油工作者采用新思路和新技术,欠平衡钻井理论与配套技术研究就

是在这种形势下大规模开展起来的,并取得了突飞猛进的发展,成为继水平井技术之后的另一大发展方向。由于其明显的技术优势(例如:机械钻速快、储层保护效果明显等),加上不断完善的配套设备和技术(例如:井口旋转控制系统、高压注气系统、地面分离系统、监测仪表系统以及相应的完井、测井技术和软件技术),使得欠平衡钻井技术在美国、加拿大和欧洲被广泛应用。我国紧随世界欠平衡钻井技术的发展潮流,在新疆、四川、辽河、华北、胜利等油田进行了相关的欠平衡钻井技术研究和试验,在钻井流体、地面设备、配套技术等方面取得了迅速的发展。

1.2 欠平衡钻井的基本概念

欠平衡钻井时,人们有意识地在裸眼井段,使井筒压力低于地层压力。因此,当钻遇渗透性地层时,地层流体会不断流入井筒并循环到地面加以有效控制。正因为这一点,欠平衡钻井有时也被称为“边喷边钻”。欠平衡钻井(UBD)所用概念、原理、设备、技术等方面同传统的水基钻井液钻井有着很大的区别,因此,它是一套不同于常规钻井的特殊钻井工艺技术。如图 1.1 所示,实现钻井井底压力欠平衡的方法有很多。

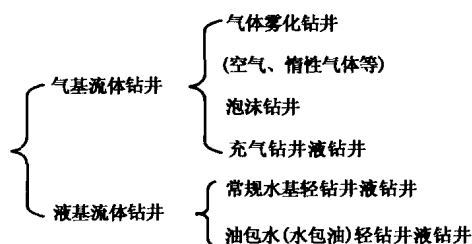


图 1.1 欠平衡钻井的实现方法

如果所钻地层压力较高,利用常规密度的钻井液就能在井底产生欠平衡压力状态,即循环钻井液的压力低于地层的有效孔隙压力。而相反的,如果地层压力较低,不用降密度剂就无法产生有效的欠平衡状态。这类降密度剂通常是非冷凝气体,如氮气、天然气或空气,也有的是玻璃或塑料微珠通过钻柱或寄生管将它与钻井液同时注入井内。这些方法通过不同的工艺改变循环钻井液的密度,让钻井液柱压力梯度小于地层孔隙压力梯度。因此,钻井液可以是气、液单相,也可以是气、液两相混合物。采用什么样的欠平衡方法主要取决于地层的压力。

不同的欠平衡方法的钻井液,各自具有不同的当量密度范围(表 1.1),以实现在不同压力的地层建立欠平衡条件。

表 1.1 欠平衡钻井流体的当量密度

流体类型	气体	雾	泡沫	充气钻井液	微珠钻井液	钻井液
当量密度(g/cm^3)	0.001 ~ 0.01	0.01 ~ 0.03	0.03 ~ 0.46	0.60 ~ 1.00	> 0.70	> 0.96

1.3 欠平衡钻井的技术优势

欠平衡钻井的技术优势及特点决定着它必将成为继钻水平井技术之后的又一钻井新技

术。欠平衡钻井在提高勘探开发水平、降低钻井成本、保护油层等许多方面均有其自身的优势。就目前国内外研究及应用来看,其主要特点如下。

1.3.1 减少地层伤害

欠平衡钻井过程中,驱使钻井液中的固相和液相进入产层的正压差消除了。因此,减少了固相与液相侵入产层近井地带造成的地层伤害。尤其在钻水平井井段时,产层长时间被浸泡在钻井液中伤害更大。而欠平衡钻水平井时,消除了正压差下的固相与液相侵入,因此能更好地保护产层。另外,当钻遇储层能量较低的衰竭油气藏时,井筒周围一旦发生伤害,这些伤害是不易消除的,而欠平衡钻井技术则是非常好的储层保护技术。对低渗透水敏或强水敏性储层最大的伤害是吸水和水敏,用欠平衡钻井是勘探开发这类储层的最佳技术,可以采用气基流体(必要时还可以对气体进行脱水、干燥),使钻井循环介质极少失水或不失水,从而无伤害或低伤害钻开储层。

1.3.2 提高机械钻速

欠平衡钻井可以提高钻速。许多文献指出用空气或低密度钻井液钻井,机械钻速比采用常规水基钻井液的过平衡钻井高。国内多个油气田的欠平衡钻井实践说明,在相同的地层采用空气钻井或泡沫钻井的钻速可达钻井液钻井的4~10倍,低密度钻井液欠平衡钻井也可提高机械钻速20%~40%。欠平衡钻井提高机械钻速的机理是:低密度钻井流体降低了井筒的液柱压力,使得井底正在被钻的岩石更容易破碎,也有助于减少“压持作用”,使钻头继续切削新岩石而不是重复碾压已破碎的岩屑,从而提高机械钻速。

1.3.3 延长钻头寿命

通常认为,用低密度钻井液钻井,钻头寿命更长。欠平衡钻井时,削弱过平衡钻井时对井底岩石的压持作用,降低了井底岩石的强度,有利于井底清洗,提高了钻井效率,在钻头达到临界磨损状态钻井进尺会更多。

1.3.4 避免井漏

井漏可能大大增加钻井成本,若钻井液漏进裂缝、低压油层或高渗油藏,就增加了额外的钻井液成本,同时堵漏费工费钱,更不用说漏失的钻井液会造成严重的地层伤害。欠平衡钻井可以减小或避免井漏问题。对于复杂地质条件下的储层,漏、喷、塌、卡均可能同时发生,欠平衡钻井技术是对付这类储层的有效技术,欠平衡钻井突破了“钻进过程中不允许漏、喷、塌”的常规观念,采用非常规压力、非常规流体,甚至非常规措施解决这类问题,创造了“边喷边钻”。

1.3.5 减少压差卡钻

常规钻井中,在过平衡压差的驱动下,在井壁上,滤液进入高渗地层,而固相颗粒则形成了滤饼。若钻柱嵌入泥饼,井筒与泥饼内液体的压差作用在如此大的接触面积上,结果钻柱要运动的轴向力可能超过其抗拉强度,造成压差卡钻。而欠平衡钻井时,井壁上没有泥饼和压差力“黏住”钻柱。

1.3.6 改善地层评价

欠平衡钻井可以改善对产层的评价,甚至可以发现常规钻井时可能被错过的产层。欠平衡钻进时,地层流体从裸眼井段进入井筒。只要所钻地层具有一定的驱动力和渗透性,钻井液的油气含量会增大并随钻井液到达地面。可通过测井工具和钻井记录,就能指示产层的潜在能力。而常规钻井阻止地层流体进入井筒,只有从岩屑、岩心分析、测井或 DST 中去确定产层。

从欠平衡钻井中用产出的油气体积量来判断产层的产能应当说是可能的。停止循环进行流动测试,如用流量传感器进行流量测试,以及修正的欠平衡随钻恢复试井方法计算储层参数。当用干气或雾化钻井时,则可直接测量返出油气流量,例如:出口火焰的长度就能定性显示产能的大小。流动测试是针对所有裸眼产层产出的总和,不同的产层不能分别测试。另外,减少地层伤害也可提高裸眼测井解释的准确性。

1.3.7 减少增产措施

常规钻井之后,通常要用增产措施以提高油气井产能。这些措施包括洗井、酸化以消除地层伤害,水力压裂以提高低渗透油藏的产能和在高渗透地层穿透伤害带。减少油层伤害意味着降低增产措施成本。

此外,欠平衡钻井还有利于保护环境以及降低作业成本。自身的优势与世界石油工业形势的需要,决定了欠平衡钻井技术具有强大的生命力和广阔的应用前景。

1.4 欠平衡钻井的技术局限

尽管欠平衡钻井可能带来众多的好处,应用上发展得非常迅速,但并不是说这已经是一项非常成熟的技术。相反,通过大量的钻井实践,这项技术还存在着许多不足之处。使用的结果很不稳定,与设计合理的常规过平衡钻井相比,设计与施工不当的欠平衡钻井往往会增加作业费用,加重地层伤害,降低油井产量。国外在欠平衡钻井技术的发展多数是在实践中摸索,对欠平衡钻井缺乏系统的理论与实验研究,导致有时对欠平衡钻井的认识和设计不合理,达不到预期的效果。目前欠平衡钻井存在以下几个方面的问题。

1.4.1 井内压力波动

欠平衡钻井过程中,有许多因素可引起井底压力波动,包括:地层流体动态流动,与高速多相流体相关的可变摩擦压力降,钻井过程中不可避免的机械故障,近井地带局部压力衰竭效应等。井底压力变化幅度较大,这可能造成欠平衡状态的短时或周期性的丧失,极不利于油层保护与井壁稳定,最终导致欠平衡钻井的失败。

1.4.2 井壁失稳

常规过平衡钻井时,井壁失稳来自于力学和化学机理等多方面影响,其中泥页岩水化是最主要的问题,井壁不稳或者地层膨胀和蠕变将导致井下卡钻。在常规过平衡钻井中,井筒与地层孔隙压力差在一定程度上支撑着井壁。欠平衡钻井中,井底负压使这种支撑作用减小。这就要求井筒压力的变化范围更小。否则,钻井不能有效进行。欠平衡压差主要取决于地层应

力状态、岩石强度、实际油藏压力和井壁的几何形状。由力学诱导的井壁不稳定性可采用限制负压差低于某个临界值的办法来解决。但在某种情况下,尤其是构造活动的区域,井壁在任何条件下都是不稳定的。当地层含有大量的水敏性黏土矿物时,易诱发井壁化学不稳定性。当用雾、泡沫或充气液钻井时,这些水敏性黏土矿物会从其中的水相中吸水。页岩含水的改变会诱发近井壁地带的二次应力,会使井壁失稳。从理论上讲,可以调节水相的活度,例如,向钻井液加入合适的电解质稳定页岩,阻止化学诱导应力发生。总之,欠平衡钻井的井壁稳定性弱于过平衡钻井时,更应引起充分重视,而且不同的地层和欠平衡钻井工况,其井壁失稳机理也不一样,需要在欠平衡钻井设计时进行充分的井壁稳定性计算和分析。

1.4.3 油层伤害

欠平衡钻井作业时,由于井内液柱压力低于地层压力,无法形成起桥堵和密封作用的滤饼。但是,没有滤饼充当防止伤害性流体和固体颗粒深深地侵入地层的屏障,地层就丧失了保护能力。因此,如果欠平衡状态遭到破坏,伤害性流体及固体颗粒也会迅速地侵入地层,由此造成的地层伤害,可能比在同样情况下过平衡钻井液所造成的地层伤害还要严重。实际上,有许多因素可能导致井底失去欠平衡状态。例如,起下钻作业,接单根以及其他因素引起的井内压力波动形成的瞬时正压差。此外,还存在其他的地层伤害机理,例如:(1)自发的逆流吸入;(2)含大量对水基钻井液滤液敏感的矿物的地层,这些矿物包括膨胀黏土、反絮凝黏土、硬石膏和岩盐等;(3)大裂缝地层,在欠平衡压力钻定向井或水平井时,钻屑就可能在重力作用下侵入井底裂缝中;(4)当地层压力很高,欠平衡压差较大时,地层流体产出速度较大,从而引起地层微粒与砂粒运移,造成堵塞产层孔喉的伤害,同时,地层大量的出砂还会导致井壁失稳。

1.4.4 钻井液污染

在欠平衡钻井作业中钻井液的主要作用包括:以一种有效的方式将钻屑输送到地面,润滑钻头或驱动井下动力钻具,安全地将产出的地层流体有效地输送到地面。欠平衡钻井不仅要考虑产层伤害,而且地层流体大量流入井内,对欠平衡钻井液的污染也是个问题。其中有:(1)非冷凝气体(通常为氮气)和产出的地层流体同循环中的钻井液不停地接触时,水同油发生紊流混合,形成极稠的稳定高黏乳状液。将增加泵压,并使气体难以在地面分离,使固控问题变得困难。另外,地层水和水基钻井液滤液混合不相容,生成结垢或沉淀物;产出油与油基钻井液混合,形成沥青沉积物。(2)产出地层水引起的稀释问题,钻井液体系也可能受到污染。例如:许多泡沫基液对油和地层盐水有不良反应;(3)腐蚀。用空气或氮气来实现欠平衡压力,盐水与循环系统中的微量氧接触时,就具有极强的腐蚀性。若地层产出气中含有 H_2S ,腐蚀问题就会更加严重。需要使用腐蚀抑制剂来防止钻柱、连续软管和井下装置过早失效,应详细分析地层游离气、溶解气量,以评价其可燃性和腐蚀性。

1.4.5 井下着火

井下着火更准确地说是井下爆炸,尽管不常发生,但其后果是令人吃惊的——钻铤与钻头被融化或烧毁。井筒中碳氢化合物与空气的混合物组分必须在燃点范围。同时还必须有爆炸

条件,如泥饼圈、井下火花、钻柱上的小孔或冲蚀。井下爆炸事故在我国新疆夏子街油田的两口空气钻井试验中曾经发生,导致该井空气钻井试验失败。

通常,采用惰性气体,可避免井下着火;雾化钻井,可减小形成泥饼圈的几率;泡沫钻井,可使空气被气泡分隔开来,一般不会燃烧。

1.4.6 井控问题

欠平衡钻井对井控也提出了特殊的要求,产出速度过大会使欠平衡钻井复杂化。地面设备应当有能力安全地处理最大产出速度的流体,也应当能够承受最大地面压力。尽管如此,当钻遇意想不到的高压地层时,若没有别的选择,只有压井或过平衡钻井。因此,欠平衡钻井的井控问题至关重要。

1.4.7 定向钻井装置

定向钻进需要随钻测量,尤其是钻水平井,面对定向钻井装置上的困难,常规的随钻泥浆脉冲自动测量仪(MWD)在气基流体中不能将井下压力脉冲信号传播到地面放大处理。尽管电磁 MWD 已经出现且发展很快,但目前其可靠性和测量深度受到限制。另外,有线电缆导向工具的测量范围受到限制,一般靠自重无法下入井斜大于 60° 的井段进行随钻测斜,且钻柱转动时,必须起出钻柱。因此,有线电缆导向工具入井与起出的额外时间,增加了欠平衡钻井时间。

常规的井下马达能由不压缩流体驱动,但使用可压缩性工作液时,马达需要更高的循环压力,增加压缩装置。高能量流体积聚在钻柱内,若上提钻头离开井底不及时泄掉钻柱内压力,会导致马达严重过载。可压缩流体的井下专用马达已经开始研究。

2 欠平衡钻井地层适应性评价方法

2.1 引言

钻井实践表明,油气勘探开发过程中欠平衡钻井技术的两个主要作用为:(1)发现和保护油气藏;(2)非储层段的提速技术。但是,欠平衡钻井技术并非适用于所有的地层条件和油藏类型。国内,许多油气田公司研究机构和钻井服务商进行欠平衡钻井的候选井位及地层适应性评价时,只针对所钻地层的三个压力剖面(孔隙压力、坍塌压力、破裂压力)进行预测,只要地层压力基本满足欠平衡钻井流体的密度范围和欠平衡钻井地面专用设备的适用范围,就草率施工,往往造成欠平衡钻井层段井壁失稳、大量出水后气基流体无法正常使用、钻井流体对特殊储层的严重伤害(例如:强水敏储层),从而无法钻达目标井深。因而,对油气田公司不仅造成严重的经济损失,而且会减缓对欠平衡钻井这项新技术的推广力度。因此,我们必须充分的认识到欠平衡钻井钻前地层适应性评价的重要性。表 2.1 给出了新疆油田 2007 年探井实施欠平衡钻井的情况统计。

表 2.1 新疆油田 2007 年探井实施气体型流体钻井情况

井 号 指 标	滴北 1	玛纳 002	古城 1	白 22	乌 352	滴 16
钻井流体	空气	空气	空气/泡沫	泡沫	泡沫	泡沫
钻进井段(m)	3365 ~ 3924.56	1247.5 ~ 1259.39	452 ~ 496.3/ 496.3 ~ 753.2	3265.84 ~ 3755.20	2058.00 ~ 2322.98	1180 ~ 2300
进尺(m)	559.56	11.89	44.3/256.91	489.36	264.98	1120
钻进地层	C	E _{2-3a}	C	P _{2x} 、P _{1f}	P _{2x}	C
终止原因	井眼垮塌	套管变形	出水/井眼垮塌	出水/井眼垮塌	井眼垮塌	完钻

造成如此情况的主要原因有:(1)钻井流体对地层的适应性评价不够完善。在对地层压力剖面预测的基础上,应着重分析欠平衡拟钻地层及上部裸眼地层的岩石矿物敏感程度;预测所钻地层的流体产出情况。(2)对地层坍塌压力预测的理论认识模糊。目前,国内外地层坍塌压力的预测方法是基于目标井邻井的测井和钻井资料的综合分析,而邻井多数采用常规钻井液钻完井,测井资料得到的岩石力学参数受到钻井液长时间浸泡的影响,强度参数呈降低趋势。若采用气体型流体钻井,利用测井数据预测的地层坍塌压

力会偏高。

国外,欠平衡钻井技术主要应用于油气田的评价和开发,许多石油公司(例如:BP公司、Weatherford公司、康菲石油公司、Schlumberger公司等)对欠平衡钻井候选区域、层段及工程可行性的论证非常重视。这些公司的研究机构在钻前评估候选地层的适应性时,必须认真考虑诸多因素,进行综合评价。这些因素包括:地层的伤害机理、井壁稳定性、井漏程度预测、地层孔隙压力、地层流体及施工风险。Schlumberger公司还对欠平衡钻井储层的增产效果进行预测,为欠平衡钻井的经济性定量评估提供数据支持(见图2.1)。如此,不仅能最大限度的保证欠平衡钻井的施工安全,而且确保欠平衡钻井保护储层和提高产量效果的充分发挥。

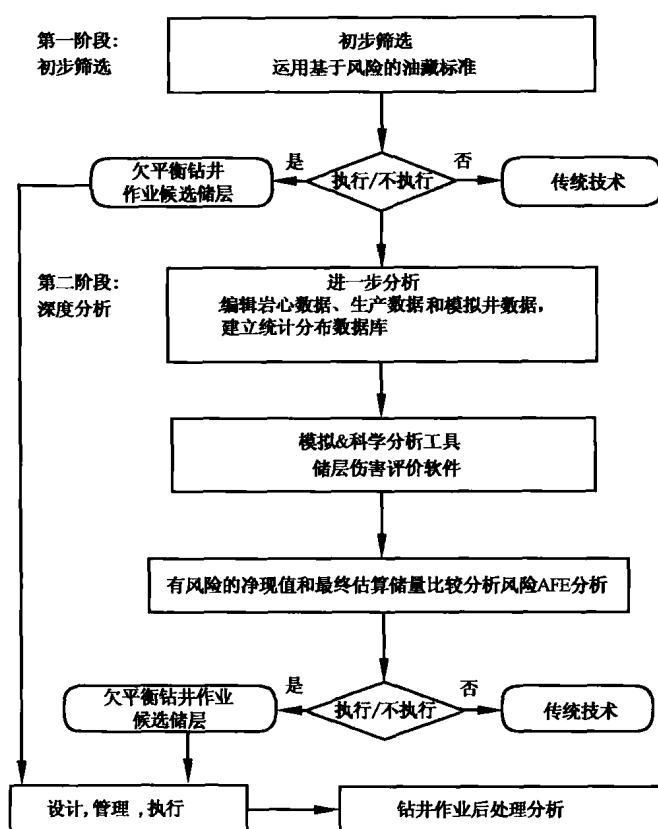


图 2.1 Schlumberger 公司欠平衡钻井的储层评价流程

通过对国内外欠平衡钻井理论研究成果的调研分析,结合欠平衡钻井的实践情况,本章建立了欠平衡钻井地层适应性评价流程图(见图2.2)。作者从欠平衡钻井所钻地层的地质方面着手,建立一套较完整的欠平衡钻井地层适应性评价方法,为筛选适合欠平衡钻井的地层和流体类型提供准确的决策依据,并为欠平衡钻井工程提供参数预测和事故提示。其中,着重对欠平衡钻井候选地层的井眼稳定性、岩石矿物敏感性、出水情况进行预测。