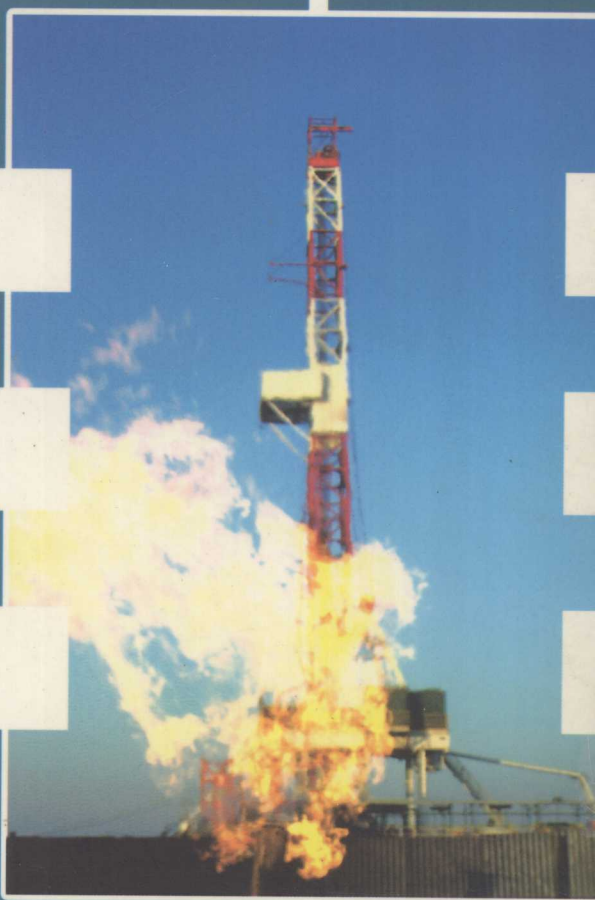


欠平衡钻井 技术与应用

周英操 翟洪军 等编著



QIAN PINGHENG ZUANJING
JISHU YU YINGYONG

石油工业出版社

欠平衡钻井技术与应用

周英操 翟洪军 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书在参考国内外大量资料的基础上,系统地阐述了欠平衡钻井技术。书中首先介绍了欠平衡钻井的概念、类型及发展趋势,然后介绍了欠平衡钻井工艺技术、欠平衡钻井液技术、欠平衡井完井技术、欠平衡钻井装备、欠平衡钻井工程设计及欠平衡钻井下步发展方向,最后收录了具有代表性的典型实例,包括流钻和人工诱导欠平衡钻井实施技术,对研究和实施欠平衡钻井技术具有重要的指导作用。

本书是从事欠平衡钻井工作的领导干部及技术人员必备的实用工具书,可供油气田钻井和油气田开发研究、设计技术人员应用和参考,也可做培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

欠平衡钻井技术与应用/周英操等编著.
北京:石油工业出版社,2003.11
ISBN 7-5021-4436-6

I. 欠…
II. 周…
III. 油气钻井, 欠平衡-技术
IV. TE249

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第099233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)
河北省徐水县印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 13.25印张 330千字 印1—2000
2003年11月北京第1版 2003年11月河北第1次印刷
ISBN 7-5021-4436-6/TE·3109

定价:30.00元

前 言

从石油工业发展的形势来看，常规的钻井方式已不能满足现代钻井的需要，欠平衡钻井技术已成为钻井技术发展的热点。该技术有利于降低油气勘探开发成本，最大限度地保护油气层；有利于中小型油气田、非常规油气藏、低压低渗油气藏的勘探开发；有利于油田中后期改造挖潜。因此，欠平衡钻井由于其技术的先进性为勘探、开发带来了广阔的前景，在油气田开发中发挥着越来越重要的作用。

本书结合国内外欠平衡钻井实践，主要以流钻欠平衡理论为基础，对该技术进行了全面介绍，内容涉及欠平衡钻井的概念、类型、发展趋势、工艺、钻井液、完井技术、钻井装备、钻井工程设计以及发展方向等诸多方面。本书突出了理论性、实用性和可操作性相结合的特点，目的是希望能给读者提供参考和启迪，促进欠平衡钻井技术的进一步研究和完善，并推动我国在该技术领域方面的研究与应用工作。

本书由大庆石油管理局钻井工程技术研究院“欠平衡钻井技术研究”项目组主要研究人员编著完成，主编：周英操、翟洪军，副主编：王洪潮、耿晓光、和传健、王广新，参加本书编写的作者还有姜玉芳、韩玉安、郑涛、鹿志文、郝立志，全书由何新民教授级高级工程师审阅。本书在编写过程中参考引用了很多专家的文献资料，同时大庆石油管理局钻井工程技术研究院对本书的出版给予了很大帮助，在此一并表示感谢。

由于作者水平所限，书中难免存在疏漏和错误，敬请广大读者批评指正。

编 者

2003年7月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 欠平衡钻井的状况及发展趋势	(1)
第二节 欠平衡钻井的定义	(2)
第三节 欠平衡钻井的类型与应用范围	(3)
第四节 欠平衡钻井的优点及缺点	(9)
第二章 欠平衡钻井工艺技术	(11)
第一节 欠平衡钻井井底压力计算	(11)
第二节 欠平衡钻井井控技术	(35)
第三节 欠平衡钻井采集与分析处理系统	(50)
第三章 欠平衡钻井液技术	(62)
第一节 欠平衡钻井液体系的选择	(62)
第二节 两相流流动及三相流携屑能力	(65)
第三节 各种类型欠平衡钻井液体系	(74)
第四节 欠平衡压井液的选择	(85)
第四章 欠平衡井完井技术	(87)
第一节 欠平衡钻井配套完井方法	(87)
第二节 欠平衡完井工艺技术	(88)
第三节 欠平衡钻井配套固井技术的应用分析	(89)
第五章 欠平衡钻井专用装备	(92)
第一节 设备的组成	(92)
第二节 设备的井场布置及钻井工艺流程	(92)
第三节 旋转防喷器及其控制系统	(94)
第四节 节流管汇及其控制系统	(102)
第五节 液气分离器	(103)
第六节 燃烧系统	(105)
第七节 其他系统	(106)
第八节 不压井起下钻装置	(110)
第九节 充气、泡沫欠平衡钻井设备	(114)
第六章 欠平衡钻井工程设计	(119)
第一节 设计原则、步骤和内容	(119)
第二节 关键设计因素的考虑	(120)
第三节 欠平衡钻井 HSE	(132)
结语	(136)
实例一 宋深 101 井欠平衡钻井实践	(141)
实例二 欠平衡钻井技术在卫深 5 井中的应用	(148)

实例三	板深 7 井欠平衡钻井技术	(155)
实例四	板深 8 井欠平衡钻井技术	(159)
实例五	解放 128 井欠平衡钻井技术	(162)
实例六	连续油管欠平衡钻井技术	(168)
实例七	负压钻井技术在威利斯顿盆地的应用	(174)
实例八	柴油机尾气欠平衡钻井技术	(178)
实例九	欠平衡泡沫流体钻井工艺技术	(181)
实例十	伊朗空气和空气/泡沫钻井实践	(185)
实例十一	隆 9 井空气、雾化、泡沫钻井技术	(195)
参考文献		(203)

第一章 绪 论

第一节 欠平衡钻井的状况及发展趋势

欠平衡钻井技术,以空气钻井为先锋,开始于20世纪50年代,主要采用空气压缩机向油井内注入空气和水的混合物。尽管最初的概念是肤浅和简单的,但由于其明显的优势(机械钻速较常规提高100%~500%)而迅速发展起来,随后在配套技术上形成了气基流体低压钻井系列(空气钻井、雾化钻井、泡沫钻井、充气钻井等),以美国为始创,进而发展到全世界,不过出于安全的考虑,当时该项技术一般不用于打开储层。

在20世纪70~80年代,美国、欧洲、中东、前苏联以及我国的四川油田经过一段时间的孕育和研究开始应用该技术打开储层增产,但鉴于当时的勘探开发形势,人们的注意力集中在高压、高渗、高产油气田,对低压、低渗、低产油气田认识不足,因此该项技术并未受到特别关注。

到了20世纪90年代,由于世界范围内油气勘探开发从整装大油田、高压和常规压力、中高渗均质砂岩等良好勘探开发条件,转移到了复杂中小油田、断块油田、薄油层、低压低渗低产能油田、老油田挖潜、复杂储层、非常规油气等恶劣的勘探开发条件,这种形势迫使勘探开发必须要有新的思路和方法,同时由于非封固完井的水平井数量增多,强化了对防止损害的关注,因此,欠平衡钻井技术成了继水平井技术之后的另一大发展方向,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、支持软件系统,使得欠平衡技术在美国、加拿大、欧洲被广泛采用,从而在世界范围内形成一股欠平衡钻井热潮,并以充气液和低密度钻井液的欠平衡水平井为主要形式,尤其以美国和加拿大两国最为突出。

根据美国Maurer Engineering公司和美国能源部对17家油公司和7家服务公司的普查结果,美国1994、1995、1996、1997、2002年欠平衡钻井数分别占美国国内年钻井总数的7.5%、10%、10%、15%、20%~30%,据统计,美国1995年欠平衡钻井口数约2100口,1996年约2500口,1997年约4000口,1998年约4100口。加拿大1995年欠平衡井数约330口,1996年约425口,1997年约525口,1998年约1500口。目前,加拿大已经开展了500多口充气欠平衡钻井,其中大多数采用注氮气方式完成。美国欠平衡钻井技术主要用于得克萨斯州和路易斯安那州的奥斯汀白垩岩层的油气开发及美国的煤层气开发中。而加拿大主要用于加拿大西部碳酸盐岩层、灰岩层及裂缝性岩层的油气开发。美国和加拿大两国欠平衡钻井技术之所以发展这么快,除装备及测试技术能达到欠平衡要求外,关键是欠平衡钻井为他们带来巨大的经济效益。例如,美国得克萨斯州西南有一个开采20年的老气田,储层压力系数降到0.272,采用稳定泡沫欠平衡钻开储层,泡沫流体减轻了地层损害,裸眼完井即获得了70800m³/d的产量。在加拿大的Rigel Halfway Pool油田,产层是三叠系Halfway

砂岩, 平均渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 孔隙度为 15% ~ 20%, 采用天然气做钻井介质进行欠平衡钻进, 正式投产试产量为邻井的 10 倍, 表皮系数为零。

我国欠平衡钻井技术早在 20 世纪 60 年代已在四川油田磨溪构造的大安寨、凉高山地层进行过试验, 当时只是用清水钻进, 进行“边喷边钻”。进入 90 年代以来, 我国欠平衡技术也在加速发展, 尤其是塔里木油田解放 128 井、轮古系列井欠平衡钻井的成功, 将我国欠平衡钻井推向了一个新的阶段。欠平衡钻井在我国各油田逐渐受到重视, 为了实现欠平衡钻井, 各油田都在引进顶驱钻机及井口装置。据 2003 年 4 月统计, 我国各海上、陆地油田已引进各种类型旋转防喷器近 40 套, 包括克拉玛依、四川、长庆、玉门、塔里木、吐哈、中原、胜利、大港、辽河、大庆等油田共进行了 107 口欠平衡钻井试验。最为成功的是大港油田, 在千米桥古潜山应用欠平衡钻井, 发现了一个亿吨级的油田, 取得非常好的效益, 典型井为板深 7 井、板深 8 井。大庆油田在松辽盆地北部徐家围子断陷带采用控流法进行了 6 口欠平衡深层气直探井试验, 取得了较好的勘探效果, 其中卫深 5 井钻进中途测试日产气 $18.3 \times 10^4 \text{m}^3$, 增产后日产天然气 $105 \times 10^4 \text{m}^3$, 取得了松辽盆地深层气勘探的历史突破。

目前, 国内各油田都把欠平衡钻井作为钻井技术的重要发展方向之一, 正在积极从装备和技术上做准备工作, 争取用欠平衡钻井技术取得好的勘探开发效果。欠平衡装置的国产化正在开展, 四川油田的小级别旋转头和不压井起下钻装置已经配套成型。另一方面, 国际钻井招标也越来越多地要求采用欠平衡钻井技术, 也将促使我国欠平衡钻井技术的发展。

在未来钻井技术发展中, 欠平衡钻井技术将同水平井、分支井、连续管钻井一样, 成为一种趋势, 而它们之间的结合应用是经济有效开发新老油藏的发展方向。欠平衡技术加水平井、导向钻井, 用于提高勘探成功率; 欠平衡技术加水平井、分支井、超常水平井, 用于提高开发效益; 欠平衡技术与连续软管钻机、老井加深、老井侧钻、小井眼钻井技术, 用于老油气田改造挖潜; 欠平衡技术加超常水平井、分支水平井, 用于低渗、强水敏油气田增产改造, 部分代替水力压裂。钻井技术和井控技术的进步已经使欠平衡钻井技术成为开采油气的一种既安全又经济的手段, 尤其是针对油气田开发后期的低压低渗油藏。

第二节 欠平衡钻井的定义

国内外关于欠平衡钻井的定义有很多说法, 但最终都是反映井筒内压力与地层孔隙压力之间的关系, 其中:

1) 美国石油协会在“钻井用防喷装备”——RP53 草案第十三条定义为: 欠平衡压力钻井是在钻井过程中允许地层流体进入井内, 循环出井, 并在地面加以控制的钻井技术。简称“UBD”, 即 Under Balanced Drilling。

2) 加拿大能源储备部定义为: 钻井过程中钻井液柱压力低于产层压力, 若钻井液密度不够低, 则在钻井液中充入气体, 允许地层流体进入井眼, 并可将其循环至地面加以控制的钻井技术。

3) 我国几个进行过欠平衡钻井的油田认为: 在钻井过程中钻井液柱压力低于地层压力, 使产层的流体有控制地进入井筒并将其循环到地面, 这一钻井技术称欠平衡钻井。

上述几个国家的定义大致相同, 根据定义, 可以理解为“欠平衡”主要是根据钻井过程而言。只要在具备实施欠平衡层段中用一只钻头穿过, 即可顺利实现欠平衡钻井。

笔者认为“钻井液柱压力低于地层压力”这一说法不准确，应该考虑到环空摩阻、井口回压等因素，因而可定义为：在钻井过程中钻井液循环体系井底压力低于地层孔隙压力，使产层的流体有控制地进入井筒并将其循环到地面，这一钻井技术称欠平衡钻井。

还有一种说法，认为除钻井外，只有在起下钻、测井、完井过程中均实现欠平衡，才能作为具有真正含义的“欠平衡钻井”。根据国内外技术发展状况，解决上述难题的装置及技术正逐步完善，如欠平衡情况下的起下钻装置、随钻测井等。

第三节 欠平衡钻井的类型与应用范围

一、欠平衡钻井类型

欠平衡钻井分为两种类型，即流钻（Flow Drilling）和人工诱导（Artificial Inducing）的欠平衡钻井。所谓流钻欠平衡钻井，就是用合适密度的钻井液（包括清水、混油钻井液、原油、柴油、添加空心固体材料钻井液等）进行的欠平衡钻井；而人工诱导欠平衡钻井，就是用充气钻井液、泡沫、雾，甚至用气体作循环介质进行的欠平衡钻井。

早期的欠平衡钻井作业因使用充气钻井液而不能使用 MWD 随钻测量系统，但随着钻井工艺的改进，使用了同心管或寄生管注氮方法，使得脉冲信号可以在充满液体的钻柱中向上传输，实现了欠平衡钻井技术和水平井钻井技术的有效结合。

1) 按钻井循环介质的密度分类：一般而言，当地层压力当量密度大于或等于 $1.10\text{g}/\text{cm}^3$ 时，用流钻欠平衡钻井，否则可用人工诱导欠平衡钻井。这两类方法不是绝对的，实际应用时应根据具体情况进行选择。例如当井较深、环空截面积很小，即便地层压力当量密度为 $1.10\text{g}/\text{cm}^3$ ，由于循环钻井液时产生的循环压耗很大，也可能要用人工诱导法才能实现欠平衡；若用原油（或油包水、水包油）作循环介质，当井浅时，即使地层压力当量密度低于 $1.00\text{g}/\text{cm}^3$ ，也能实现流钻欠平衡钻井。

在美国奥斯汀，曾用密度高达 $1.80\text{g}/\text{cm}^3$ 的钻井液欠平衡钻开地层压力当量密度 $2.04\text{g}/\text{cm}^3$ 的储层。我国青海油田开 2 井欠平衡钻井液密度达到 $1.50\text{g}/\text{cm}^3$ 以上。

在有些探区，也有用欠平衡钻井的设备和工艺来解决部分井漏或又溢又漏的复杂钻井问题，如国内塔里木探区就曾用密度为 $2.04\text{g}/\text{cm}^3$ 的钻井液进行欠平衡钻进，以解决又漏又溢的复杂情况；也有用欠平衡钻井的设备和工艺来针对一般较稳定的地层或非主要产层进行抢钻以提高机械钻速，如四川地区就有用清水抢钻的例子。实践证明，只要条件允许，运用得当，这些都是可行的。

2) 按工艺分类：可分为液体、气体、雾化、泡沫、充气欠平衡钻井技术和泥浆帽钻井技术。采用常规钻井液（包括水基、油基以及有固相和无固相钻井液）的欠平衡钻井技术为液体欠平衡钻井技术。欠平衡钻井技术对应的密度为：

① 气体钻井：包括空气、天然气、废气和氮气钻井，密度适用范围为 $0\sim 0.02\text{g}/\text{cm}^3$ 。

② 雾化钻井：密度适用范围为 $0.002\sim 0.04\text{g}/\text{cm}^3$ ，气体体积为混合物体积的 $96\%\sim 99.9\%$ 。

③ 泡沫钻井：密度适用范围为 $0.04\sim 0.6\text{g}/\text{cm}^3$ ，井口加回压时可达 $0.8\text{g}/\text{cm}^3$ 以上，

气体体积为混合物体积的 55%~96%。

④充气钻井：包括通过钻杆和井下注气两种方式。井下注气是通过寄生管、同心管在钻进的同时往钻井液中连续注气。密度适用范围为 $0.7\sim 0.9\text{g/cm}^3$ 或更高，气体体积低于混合物体积的 55%。

⑤油包水或水包油钻井液钻井：密度适用范围为 $0.8\sim 1.0\text{g/cm}^3$ 。

⑥淡水或卤水钻井液钻井：密度适用范围为 $1.0\sim 1.30\text{g/cm}^3$ 。

⑦常规钻井液钻井：密度适用范围大于 1.10g/cm^3 。

⑧泥浆帽钻井：用于钻地层较深的高压裂缝储层或高含硫化氢的气层，是另类欠平衡钻井技术。

3) 按用途分类：IADC（国际钻井承包商协会）欠平衡钻井、完井和修井委员会提出的欠平衡钻井分类为：

0 级——只提高钻井作业速度和保证钻井作业安全，不存在含碳氢化合物的地层。

1 级——井内流体依靠自身的能量不能流到地面，井眼稳定并且从安全角度来说属低级危险情况。

2 级——井内流体依靠自身的能量可以流到地面，但是利用常规的压井方法可以有效制止，并且在设备严重失效的情况下也只能产生有限的后果。

3 级——地热和非碳氢化合物的开采。最大关井压力低于旋转控制头等作业设备的额定工作压力，设备严重失效会产生直接严重后果。

4 级——油气开采。最大关井压力低于旋转控制头等作业设备的额定压力，设备严重失效会产生直接严重后果。

5 级——最大设计地面压力超过旋转控制头的额定压力，但低于防喷器组的额定工作压力。

目前投入使用的欠平衡钻井技术主要有以下几种。

1. 气相欠平衡钻井

气相钻井一般采用纯气体作为钻井液，这种气体可能是空气、氮气、天然气或任一混合气体。

(1) 干空气钻井 (Dry Air Drilling)

指用干空气作为钻井流体所进行的钻井，简称空气钻井 (Air Drilling)。

(2) 氮气钻井 (Nitrogen Drilling)

指用氮气作为钻井流体所进行的钻井。

(3) 天然气钻井 (Natural Gas Drilling)

指用天然气作为钻井流体所进行的钻井。

气相钻井的优点是钻速快且单只钻头进尺高，另外，钻成的井具有井斜小、固井质量好、完井容易、产量高等特点。

气相钻井的缺点是存在井壁不稳定因素和携屑困难。采用空气钻井，由于地层产水，对钻具具有腐蚀作用；另外，由于空气中存在氧气，容易发生井下燃爆。而氮气和天然气虽然可以克服腐蚀问题，但其存在成本高和现场供应困难等问题。因此选择哪种气体通常考虑实用性、总气量、所需气体的供给速率及化学相容性。

2. 气液两相欠平衡钻井

(1) 雾化钻井 (Atomization Drilling)

当有大量的地层水进入井眼并影响了空气—粉尘钻井时,但是水量还没有高到能引起井眼清洁问题时,应使用雾化钻井。

在雾化钻井过程中,往往要在井口往空气流中注入少量含发泡剂的水,由于空气中含有水雾而形成了一种连续的空气体系。发泡剂降低了井眼中水和钻屑的界面张力,并允许水/钻屑在返出的气流中分散成极细的雾状物。这样就可把水和钻屑从井眼中携带出去,而不会在井眼中形成泥浆环和钻头泥包。发泡剂的加量要通过试凑法来确定。

(2) 泡沫钻井 (Foam Drilling)

泡沫钻井是指钻井时将大量的气体(如空气和氮气)分散在少量含起泡剂(表面活性剂)的液体中作为循环介质的工艺,液体是外相(连续相),气体是内相(非连续相),其产生粘度的机理是气泡间的相互作用。

泡沫钻井按使用结果可分为一次性和可循环两类;按流体性质可分为稳定和不稳定(非弹性泡沫)两类。钻井中常用的泡沫为稳定泡沫,泡沫质量范围一般为53%~96%。

稳定泡沫是淡水、洗涤剂、化学添加剂、压缩空气(氮、二氧化碳、天然气和空气)的混合物。在稳定泡沫的钻井液体系中,环空上返速度一般低于0.5m/s,在侵入井眼流体低于 $1\sim 1.3\text{m}^3/\text{min}$ 的情况下,稳定泡沫能有效地携带岩屑和侵入井眼流体。

非弹性泡沫是在泡沫体系中加入膨润土和聚合物,使其有稳定井壁的功能,适用于大井眼。

(3) 充气钻井液钻井 (Gasified Fluid Drilling)

充气钻井是指钻井时将一定量的可压缩气体通过充气设备注入到液相钻井液中作为循环介质的工艺。常用注入气体主要是空气和氮气,此外还有二氧化碳、天然气、柴油机尾气,但较少使用。

从流体性质看,充气钻井属于不稳定气液两相流体。按充气方式分为地面注入法(立管注入法)和强化充气法(寄生管注入法、同心管注入法、连续油管注入法等)。

1) 立管(钻杆)注入法:直接通过钻杆将气体注入井下。

2) 寄生管注入法:将一根下端接有注气短节的油管下在套管外面,并在固井时将其封固在环空中。钻进时,钻井液通过钻杆流到井底,同时通过寄生管将气体泵到井下的环空中与钻井液混合,以达到欠平衡钻井条件。

3) 同心管注入法:事先将一根直径小于表层套管的管柱下到表层套管内,钻进时,通过两层套管间的环空将气体注入井下以降低钻井液液柱对地层的压力。

4) 连续油管注入法:通过连续油管将气体注入井下,使之穿过钻头从连续油管与井壁之间的环空返出。

强化充气法主要是解决立管法注入井内的两相流的不稳定、流态变化大、脱气严重,特别是在井深比较大时,往往不能通过加大气量的方法降低钻井液当量密度等问题,从而改善流态,减少段塞流和环雾流。

立管注入法的优点是简单,不影响井身结构设计,能降低整个循环系统密度。缺点是不能使用MWD和LWD随钻测量系统;由于排量的限制,井下马达参数优选受限。寄生管注入法和同心管注入法由于成本较高、工艺复杂(专用井口装置)、缩小井眼(同心管法)等

缺点，应用的很少。

3. 液相欠平衡钻井

(1) 控流钻井 (Flow Drilling)

控流钻井，简称流钻，是用液相钻井液所进行的欠平衡钻井（一般指不使用不压井起下钻装置）。

(2) 泥浆帽钻井 (Mudcap Drilling)

环空、节流阀关闭，环空施加重稠的流体（所谓的泥浆帽），而清稀的钻井液通过钻具进入地层实现边漏边钻的一种钻井方式。

(3) 强行起下钻钻井 (Snub Drilling)

使用不压井起下钻装置进行的欠平衡钻井。

二、欠平衡钻井必备条件

1. 准确掌握地层压力

欠平衡钻井必须首先准确掌握所钻地层的三个压力系数（破裂、孔隙、坍塌），只有准确地掌握地层压力系数，特别是地层孔隙压力，才能有效地确定井身结构、钻井液密度、欠压值、所采用的井口装置及钻井施工措施；否则，易使欠平衡钻井达不到预期目的。

2. 所钻井或井段井壁稳定、储层适合于欠平衡钻井

根据世界上钻欠平衡井所取得的经验认为，实施欠平衡井段以上地层是稳定的，或对不稳定井段下入技术套管加以封隔。同时要掌握欠平衡井段层位的物化性能，判定是否可进行欠平衡钻井。一般认为，欠平衡钻井所选的岩层有火成岩地层，不易破碎的灰岩地层，高渗（ $1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上）固结良好的结晶砂岩和碳酸盐岩，高渗、胶结较好的砂岩，微裂缝地层（裂缝开度大于 $100 \mu\text{m}$ ），对水基钻井液敏感的材料含量过高的地层（气钻）等。

3. 配备相应的地面装备

除具有常规钻井井口井控装置和节流管汇外，井口还应增加一个相应尺寸的单闸板防喷器和旋转防喷器、液动闸阀及液气分离器、油水分离器、真空除气器，燃烧管线及火炬、安全可靠的点火系统，防回火装置、循环系统的各种电器防爆装置、流量计、六方（三方）钻杆和 18° 斜坡钻杆（无标识槽）。

当地层压力系数较小时，要实现欠平衡钻井还应另配充气（或雾化、泡沫、氮气）装置。

在条件允许的情况下，应配备强行起下管串设备，以满足低压低渗产层欠平衡钻井作业不压井强行起下管柱的需要。

4. 配备相应的监测仪器、仪表

需配备地质录井仪、套压表、立管压力表、环空压力测试仪、 CO_2 、 H_2S 、天然气报警仪、天然气流量计等仪器仪表。

5. 制定一套安全操作规程和因地制宜的施工措施

需制定行之有效的工艺技术措施、应急措施、井控操作规程和 HSE 规定等。

6. 配齐训练有素的技术人员、熟练的操作人员

在欠平衡井场，要求指令下达果断、准确和及时，人员操作熟练、持证上岗、态度端正、工作细致，组织分工明确、管理严格。

三、适合欠平衡钻井的地层

1. 筛选基础数据

(1) 储层参数

1) 首先应该确定地层的渗透率、孔隙度和孔隙喉道尺寸分布资料，以便进行桥堵计算和评价是否漏失的可能性。

2) 通过井下图像和微电阻测井等确定明显的非均质性（孔洞和裂缝）和孔隙的孔径尺寸。

3) 通过岩心分析、井壁取心分析和岩屑分析（X 射线衍射、扫描电子显微镜和切片）确定地层中是否存在敏感矿物质（粘土、硬石膏等）。如果存在敏感性矿物（例如蒙脱石、混层粘土、反絮凝高岭石或其他水敏矿物），应小心评价这些矿物与准备采用的钻井液滤液和压井液间的化学反应情况。

4) 确定地层原始的含油饱和度和含水饱和度。测井评价或常规岩心分析中，如果岩心和井底区域被钻井液冲刷或处理保存岩心不当而使岩心脱水或分析过程中受外来流体冲刷，在分析中会得出错误原始饱和度值。放射性示踪法能提高岩心原始的含油饱和度和含水饱和度的精度。

5) 需要用地层的束缚水或束缚水饱和度以及毛细管压力资料来确定地层原始的含油饱和度和含水饱和度是否等于或超过束缚水饱和度。束缚水饱和度最好从毛细管压力或动态饱和度下降实验中得到。

6) 需要适当了解地层的润湿性，以便确定是否可能存在对流自吸和相圈闭效应。了解岩石的润湿性有助于定量确定在过平衡模式下水基钻井液的滤失速度。

7) 应了解存在多层油藏存在的可能性以及每一油藏的实际压力值。

8) 应确定天然固相的浓度、组分、尺寸分布，这些参数将作为固控设计的参数。

(2) 流体参数

1) 应使用标准的油、气、水分析技术确定井下油藏流体的组分（油、气、水）。

2) 应通过已知储层流体系统的闪点包络试验确定油藏流体在空气或氧气含量下降时的闪点极限。

3) 使用 API 的相容性试验和计算机模拟技术确定钻井液和地层流体接触后产生的乳化、结垢、沉淀的可能性。

2. 适合欠平衡钻井的地层

(1) 具有潜在井漏或钻井液侵害的油气藏

- 1) 晶间渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的地层;
- 2) 具有大的宏观开放型裂缝的地层 (开度大于 $100 \mu\text{m}$);
- 3) 具有大量连通孔洞的非均质碳酸盐地层;
- 4) 可以导致过平衡压力大于 6.9MPa 的压力枯竭地层;
- 5) 裂缝型渗透通道的产层。

(2) 具有岩石—流体敏感性的地层

相当大的地层损害可能是由于不相溶水基滤液与地层粘土或其他活性材料的有害反应引起的。许多地层含有水活性粘土,如蒙脱石或混层活性粘土,这些粘土与非抑制性水基钻井液接触会发生膨胀,并严重影响采收率,而且在某种情况下,会影响近井眼区域固结。有些地层可能还含有悬浮粘土和细颗粒或可运移材料,如高岭石粘土、碎岩屑、焦沥青和无水石膏。这些问题可以通过采用油基或抑制性水基钻井液的欠平衡钻井技术来解决。

(3) 具有液—液敏感性地层

欠平衡钻井可以防止不相容的钻井液滤液侵入地层,从而消除侵入滤液与地层盐水或原油发生有害反应,其中的一种有害反应是高粘水包油乳化剂钻井液被圈闭在近井眼区域。另外的有害反应包括:由于油基钻井液侵入油气藏原油引起脱沥青,从而导致渗透率的降低;由于不相容的水基钻井液滤液和地层盐水混合而导致地层胶合和固相沉淀。

(4) 具有潜在自吸能力的地层

由于有害的相对渗透率效应,近井眼区域的水或烃形成永久性圈闭,从而导致地层产量的降低。利用一种非湿性流体作为欠平衡钻井的基液,并维持欠平衡状态,就可以防止自吸和降低相圈闭的可能性,从而防止钻井液基液进入地层而直接产生驱替和圈闭。

(5) 油藏性质高度易变的地层

在油气藏渗透率、孔隙度和孔喉尺寸的分布上呈现出很大差别的高度层状地层、大量砂岩或碳酸盐地层设计过平衡钻井难度较大,而应用欠平衡钻井实现均匀的开采。

(6) 具有活跃的地下水并且对水锥进敏感的地层

在这样的地层如果采用过平衡钻井,那么钻井液会侵入地层,引起水锥进效应,并且在完井后的试油作业中很容易向水层打开通道,给今后的开采带来麻烦。而欠平衡钻井,由于井底压力低于地层孔隙压力并且不需要试油作业,所以可以降低或避免以上问题的发生。

(7) 低钻速地层

对于某些硬地层来说,利用欠平衡钻井可以大幅度提高机械钻速,从而减少钻井时间和相关费用。

3. 不适合欠平衡钻井的地层

1) 高压和高渗透率相结合的地层。从地层损害观点看,虽然埋藏较深的高压、高渗透率地层比较适合欠平衡钻井,但在地面可能出现安全和井控问题。

2) 受压力束缚的地层。具有不同压力的多个产层的油气藏或在给定目的层中存在明显压力变化的油气藏,是不适合欠平衡钻井的。

3) 常规地层。对于常规地层,如渗透率低于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的均匀晶间地层以及具有较低的岩石—流体和流体—流体敏感性的地层,设计合理的过平衡作业与价格较高、风险较大的欠平衡作业相比,效果可能更好。

4) 地层孔隙压力不清或井壁稳定性差,需要足够钻井液密度才能控制井塌的地层。

- 5) 含大量 H_2S 或 CO_2 气体的产层。
- 6) 人口密集区、重要设施附近和环境保护特别严格的地区。

第四节 欠平衡钻井的优点及缺点

一、欠平衡钻井的优点

1. 减少对产层的损害，有效保护油气层，从而提高油气井的产量

常规钻井一般都是过平衡钻井，由于钻井液液柱压力高于地层压力，不可避免地会造成钻井液滤液和有害固相进入产层，从而造成对产层的伤害。在某些情况下这种伤害将永久地降低油井的产量，需要进行费用昂贵的增产措施和修井作业才能达到地层的经济产量水平。采用欠平衡钻井，由于井筒内钻井液液柱压力低于地层压力，钻井液滤液和有害固相的侵入就会减轻或消除，从而有效地保护了油气层，减少或免去油层改造等作业措施及昂贵的费用，尤其在水平井中的优势很明显，这是实施欠平衡钻井技术的最大益处。

2. 有利于及时发现和评价低压低渗油气层，为勘探开发整体方案设计提供准确依据

过平衡钻井对产层造成的伤害很可能使预期本应该出现的油气显示没有出现，从而影响了油气的勘探和开发。而在欠平衡钻井条件下，钻井过程中地层流体可以进入井眼，在井口监测返出液就可以适时提供良好的产层信息，从而有利于达到勘探和开发目的，并可以及时对产层进行较为准确的评价。

3. 大幅度提高机械钻速，延长钻头使用寿命，从而缩短钻井周期，减少作业及相关费用

由于采用负压钻进，使井底岩石三相应力状态发生了变化，减小了压持效应，有利于钻头对岩石的破碎，从而大幅度提高机械钻速，缩短钻井周期，降低钻井综合成本。

4. 有效地控制漏失，并减少和避免压差卡钻等井下复杂情况的发生

常规过平衡钻井不可避免地会引起钻井液的漏失，尤其在易漏层段更为严重，会造成进一步的事故和复杂，延长钻井周期，增加钻井成本。而欠平衡由于井筒内钻井液液柱压力低于地层压力，从而可以大大降低井漏发生的几率，另外可以基本消除压差卡钻的问题。

5. 可以在钻井过程中生产油气

由于欠平衡钻井是有控制地制造溢流，油气可有控制地从井内返出到地面，经分离处理后，可以作为钻井过程中的副产品加以利用或出售，从而补偿欠平衡作业的辅助费用。美国得克萨斯州的一些井采用欠平衡钻井，在钻井过程中生产的油气几乎可以把全部钻井成本收回，而加拿大政府为了鼓励油公司实施欠平衡钻井达到保护油气层的目的，规定在钻井过程

中生产的油气免交资源税。

二、欠平衡钻井的缺点

1. 钻井成本高

- 1) 钻井设备多、井场面积大，占地费用高；
- 2) 钻机日租金高；
- 3) 控流钻井通常采用含油钻井液，成本高；
- 4) 采用注氮方式进行欠平衡钻井时，特别是在边远地区采用现场制氮设备制氮时，制氮设备的租金较高；
- 5) 完井时若采用强行起下钻设备起下钻柱，导致钻井成本上升。

2. 存在不安全隐患

- 1) 井喷、井塌；
- 2) 使用空气作为注入气可能造成井下爆炸或钻具腐蚀。

3. 地层损害

在欠平衡钻井过程中，地层压力高于循环钻井液井底压力，所以在岩石表面不能形成泥饼，一旦在钻井和完井作业期间不能保持连续的欠平衡状态，无泥饼的井壁无法阻止液相和固相对地层的侵入，有更大的污染机遇。

第二章 欠平衡钻井工艺技术

欠平衡钻井技术作为一项为油气田勘探开发服务的新技术，与其他新型钻井技术一样，工艺技术是核心。而欠平衡钻井工艺的核心就是井底压力的研究与控制，其中，井底负压值的大小直接影响到地层流体进入井筒内量的多少，关系到能否安全、快速钻进。井底压力控制是欠平衡钻井成功的关键，能否设计和保持一个理想的欠平衡状态会影响到整体勘探开发效果。

本章详细论述了欠平衡钻井井底压力几种实用计算方法和多相流流态下的井底压力研究进展，以及各种工况条件下的欠平衡井控技术和应急措施，同时介绍了欠平衡数据采集和分析处理系统的应用。

第一节 欠平衡钻井井底压力计算

一、基本概念

1. 地层压力

地层压力是地下岩石孔隙内流体的压力，也称孔隙压力，用 p_p 表示。正常情况下，地下某一深度的地层压力等于地层流体作用于该处的静液压力；凡是低于或高于地层水静液柱压力的叫异常低压或异常高压。

2. 地层压力梯度

指单位深度内地层压力的增加值。

$$p_p = 9.8\rho H$$

$$G_p = p_p/H = 9.8\rho \quad (2-1)$$

式中 p_p ——地层压力，kPa；
 G_p ——地层压力梯度，kPa/m；
 ρ ——地层水的密度，g/cm³；
 H ——井深，m。

3. 地层破裂压力

根据 API RP59 定义，地层破裂压力指的是使地层岩石发生永久变形、破裂或裂缝的压