

JINGXI KONGYA ZUANJING JISHU JIQI YINGYONG

# 精细控压钻井技术 及其应用

◎ 周英操 等著



石油工业出版社

内容提要

# 精细控压钻井技术及其应用

周英操 等著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书系统地阐述了精细控压钻井技术与装备,包括精细控压钻井技术发展历程及现状、控压钻井的类型、应用范围及特点、精细控压钻井工艺技术、精细控压钻井专用装备、精细控压钻井工程设计、精细控压钻井技术应用实例分析、精细控压钻井井底压力控制影响因素及关键技术、常规控压钻井技术、控压钻井技术发展方向及趋势等内容,对研究和实施控压钻井技术具有重要的指导作用。

本书是从事相关技术工作的管理人员、技术人员的实用参考用书,可供研究人员、设计技术人员、现场技术人员应用,也可供院校相关专业师生做参考学习资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

精细控压钻井技术及其应用 / 周英操等著.  
—北京:石油工业出版社,2018.4  
ISBN 978-7-5183-2493-4

I. ①精… II. ①周… III. ①油气钻井  
IV. ①TE242

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第049346号

---

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号楼 100011)

网 址: [www.petropub.com](http://www.petropub.com)

编辑部:(010)64523583 图书营销中心:(010)64523633

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

---

2018年4月第1版 2018年4月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:20.5

字数:520千字

---

定价:90.00元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

# 《精细控压钻井技术及其应用》 编写组

组 长：周英操

副组长：刘 伟 翟小强 郭庆丰 张兴全

成 员：王 瑛 罗良波 滕学清 宋周成 马金山

马青芳 唐雪平 周泊奇 付加胜 许朝辉

朱卫新 段永贤 胡志坚 王 鹏 魏臣兴

梁 磊 王国伟 张 鑫 门明磊 李鹏飞

康 健 屈宪伟 赵莉萍 王一博

# 前 言

精细控压钻井技术可使复杂地层普遍存在的井涌、漏失、坍塌、卡钻等井下复杂，特别是“溢漏同存”的窄密度窗口这一世界性钻井难题得到有效解决，提高复杂压力地层钻探成功率，降低成本，实现安全、高效、快速钻井作业。通过中国石油集团工程技术研究院有限公司研发的PCDS精细控压钻井系统的钻井实践证明，精细控压钻井技术越来越多地体现出常规钻井技术无法比拟的技术优势。精细控压钻井技术是一项新的先进钻井技术，是未来闭环钻井技术发展的一项重要基石。

本书对精细控压钻井技术与装备进行了系统的总结，包括精细控压钻井技术发展历程及现状、控压钻井应用范围及特点、精细控压钻井工艺技术和专用装备、精细控压钻井工程设计技术、精细控压钻井应用实例分析、控压钻井井底压力控制影响因素及关键技术、常规控压钻井技术和控压钻井技术发展方向及趋势等。本书的编写突出了理论性、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，促进精细控压钻井技术与装备的深入研究和推广应用，推动该技术的进步。

本书由周英操任编写组组长，刘伟、翟小强、郭庆丰、张兴全任编写组副组长。具体各章编写人如下：第一章由周英操、刘伟编写；第二章由周英操、刘伟、翟小强编写；第三章由周英操、郭庆丰、刘伟、罗良波、唐雪平、王鹏编写；第四章由郭庆丰、王瑛、滕学清、翟小强、付加胜编写；第五章由刘伟、王瑛、宋周成、马金山、许朝辉、段永贤编写；第六章由张兴全、周英操编写；第七章由翟小强、周泊奇、马青芳、朱卫新、胡志坚、魏臣兴编写；第八章由周英操、刘伟编写。参加本书编写的人员还有：梁磊、王国伟、张鑫、门明磊、李鹏飞、康健、屈宪伟、赵莉萍、王一博。全书由周英操教授级高级工程师策划、统稿与审阅。本书在编写过程中参考引用了很多专家、学者的文献资料，同时中国石油集团工程技术研究院有限公司对本书的出版给予了大力的支持与帮助，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。

# 目 录

第一章 绪论 .....	( 1 )
第一节 精细控压钻井技术发展历程与现状 .....	( 1 )
第二节 控压钻井的类型、应用范围及特点 .....	( 6 )
第二章 精细控压钻井工艺技术 .....	( 9 )
第一节 精细控压钻井的基本原理 .....	( 9 )
第二节 控压钻井技术的分级 .....	( 11 )
第三节 井底恒压控压钻井技术 .....	( 13 )
第四节 微流量控制钻井技术 .....	( 17 )
第三章 PCDS 精细控压钻井专用装备 .....	( 19 )
第一节 PCDS 精细控压钻井装置总体设计 .....	( 20 )
第二节 PCDS-I 精细控压钻井专用装置 .....	( 34 )
第三节 PCDS-II 精细控压钻井专用装置 .....	( 46 )
第四节 PCDS-S 精细控压钻井专用装置 .....	( 51 )
第五节 精细控压钻井配套专用设备及工具 .....	( 58 )
第四章 精细控压钻井工程设计 .....	( 77 )
第一节 精细控压钻井工程设计主要内容 .....	( 77 )
第二节 精细控压钻井作业规程 .....	( 86 )
第三节 精细控压钻井井控 .....	( 94 )
第四节 精细控压钻井系统现场使用与维护 .....	( 97 )
第五节 精细控压钻井设计实例 .....	( 113 )
第五章 精细控压钻井技术应用分析 .....	( 136 )
第一节 概述 .....	( 136 )
第二节 窄密度窗口精细控压钻井技术应用案例 .....	( 138 )
第三节 裂缝溶洞型碳酸盐岩水平井精细控压钻井技术应用案例 .....	( 150 )
第四节 低渗特低渗储层精细控压钻井技术应用案例 .....	( 162 )
第五节 微流量控制钻井技术应用案例 .....	( 171 )
第六节 近平衡精细控压钻井技术应用案例 .....	( 183 )
第七节 易涌易漏复杂工况精细控压钻井技术应用案例 .....	( 189 )

<b>第六章 控压钻井井底压力控制影响因素及关键技术</b> .....	(196)
第一节 钻井井底压力控制的影响因素分析 .....	(196)
第二节 钻井水力参数对井底压力影响分析 .....	(199)
第三节 不同钻井方式对井底压力控制的分析 .....	(217)
第四节 异常工况对井底压力控制的分析 .....	(235)
<b>第七章 常规控压钻井技术</b> .....	(263)
第一节 井口连续循环钻井系统 .....	(263)
第二节 阀式连续循环钻井系统 .....	(274)
第三节 充气控压钻井技术 .....	(282)
第四节 双梯度钻井技术 .....	(287)
第五节 加压钻井液帽钻井技术 .....	(294)
第六节 其他常规控压钻井技术 .....	(296)
第七节 控压固井完井技术 .....	(298)
第八节 控压钻井配套技术 .....	(300)
<b>第八章 控压钻井技术发展方向及趋势</b> .....	(302)
第一节 控压钻井技术与装备的发展趋势 .....	(302)
第二节 控压钻井技术应用展望 .....	(311)
<b>参考文献</b> .....	(315)

# 第一章 绪 论

深层复杂油气藏，特别是深层海相地层，其地层压力高、温度梯度大、流体物性变化大、介质复杂而且常伴有  $H_2S$ ；而且随着裸眼井段增加，可能出现压力梯度、地温梯度发生转变，导致钻井液安全密度窗口窄，易引发井涌、井漏、井壁坍塌、卡钻等一系列钻井问题，甚至导致钻井作业无法正常进行。

由于安全和环保的要求，常规钻井不允许在井底形成过高的欠压值，使井口有大量油气在钻井过程中产出，但从保护储层的角度上还需要有一定的欠压值，即需要井底压力在平衡点的“安全区域内”波动。在属于高压、高产、高含  $H_2S$  地层的高风险深井钻井，更不希望使用欠平衡钻井，但是使用过平衡钻井又容易引发井漏等问题，增加非生产作业时间。为避免上述问题，希望找到一种更为精确地约束和控制井筒压力的方法。欠平衡钻井技术 (UBD) 是 20 世纪 50 年代从美国兴起的技术，技术关键是井底压力小于地层压力的条件下打开储层，目的是有利于发现储层、保护储层、提高钻速、减少复杂等。但是，随着深层油气资源勘探开发的深入，原有的欠平衡钻井技术已经无法完全满足安全、高效的钻完井施工要求。

## 第一节 精细控压钻井技术发展历程与现状

精细控压钻井技术是国际上针对窄密度窗口的安全钻井难题发展起来的一项前沿钻井技术。精细控压钻井技术可以有效解决钻探过程中由于压力敏感导致的井下复杂，特别是针对复杂深井超深井地层中存在的窄密度窗口、长井段同一压力系统、易坍塌和漏失的薄弱地层、枯竭油气层、深海海底油藏等问题，都有很好的应用效果。国际钻井承包商协会欠平衡作业和控制压力钻井委员会 (IADC Underbalanced Operations & Managed Pressure Drilling Committee) 将精细控压钻井 (Managed Pressure Drilling, MPD) 定义为：“精细控压钻井是一种用于精确控制整个井眼环空压力剖面的自适应钻井过程，其目的是确定井下压力环境界限，并以此控制井眼环空液柱压力剖面的钻井技术”。精细控压钻井的最初意图是避免地层流体不断侵入至地面，作业中任何偶然的流入都将通过适当的方法安全地处理，2008 年 7 月，周英操等在《控压钻井技术探讨与展望》一文中认为把“MPD”译为“精细控压钻井”更贴近钻井工艺实际情况，并提出了“欠平衡精细控压钻井技术”的理念。“MPD”有别于 Controlled Pressure Drilling，简称 CPD，即控压钻井。

精细控压钻井技术具体描述为：

- (1) 设计环空液压剖面，将工具与技术相结合，通过钻进过程中的实时控制，可以在井眼环境条件限制的前提下减少钻井的风险与综合成本；
- (2) 可以对井口回压、流体密度、流体流变性、环空液面、循环摩阻以及井眼几何尺寸等影响井底压力因素进行综合分析，并实现精确控制；
- (3) 可以快速校正并处理监测到的压力变化，动态控制环空压力，从而能够更加经济地



完成钻井作业。

### 一、国外精细控压钻井技术发展历程与现状

控压钻井技术早在 20 世纪 60 年代中期就开始在陆地钻井作业中应用，但没有引起业界足够的关注，近年来，随着复杂压力系统钻井和对钻井安全的关注，特别是海上勘探开发的不断发展，这项技术越来越受到钻井决策者的重视，从而使控压钻井技术得到了快速发展。精细控压钻井技术于 2003 年 IADC/SPE 会议上首次提出，该技术主要是通过对井口回压、流体密度、流体流变性、环空液面高度、钻井液循环摩阻和井眼几何尺寸的综合控制，使整个井筒的压力得到有效地控制，进行欠平衡、平衡或近平衡钻井，有效控制地层流体侵入井筒，减少井涌、井漏、卡钻等多种钻井复杂情况，非常适宜孔隙压力和破裂压力窗口较窄的地层作业。据报道，控压钻井对井眼的精确控制可解决 80% 的常规钻井问题，减少非生产时间 20%~40%，从而降低钻井成本。

随着控压钻井技术的发展，逐渐形成了系统的工艺理论，形成了不同控压钻井的工艺技术和方法，如井底恒压控压钻井技术(CBHP)、微流量控制钻井技术(MFC)、加压泥浆帽钻井技术(PMCD)、双梯度钻井技术(DGD)、HSE(健康、安全、环境)控压钻井技术等。目前，国际上 Schlumberger、Halliburton、Weatherford 等公司已进行了相关的精细控压钻井技术研究和现场应用，取得了较好的应用效果。

### 二、国内精细控压钻井技术发展历程与现状

2008 年开始，中国石油集团工程技术研究院有限公司组织科研攻关团队，依托国家科技重大专项项目自主研发，在精细控压钻井成套工艺装备等方面取得重大突破，填补了国内空白，使中国成为少数掌握该项技术的国家。专家评价：该成果在理论技术上有重大创新，整体达到国际先进水平，在欠平衡控压钻井工艺、工况模拟与系统评价方法上达到国际领先。取得的创新点如下：

(1) 自主研发国内首套精细控压钻井成套工艺装备，包括自动节流、回压补偿、井下随钻测量、监测与控制软件系统。创新形成多策略、自适应的环空压力闭环监测与优化控制技术，实现了 9 种工况、4 种控制模式和 13 种复杂条件应急转换的精细控制，井底压力控制精度 0.2MPa 以内，技术指标优于国际同类技术，形成规范和行业标准。

(2) 创新建立集钻井、录井、测井于一体的控压钻井方法，实现了作业现场数据采集、处理与实时控制；独创了井筒压力与流量双目标融合控制的钻井工艺及井筒动态压力实时、快速、精确计算方法。实现了深井井下复杂预警时间较常规钻井提前 10min 以上，为安全控制赢得时间；成功实现穿越深部碳酸盐岩水平井多套缝洞组合，水平段延伸能力平均增加 210%，显著提高了单井产能。

(3) 首次突破国际控压钻井采用微过平衡的作业理念，率先开展欠平衡控压钻井应用，创新形成欠平衡精细控压钻井工艺。建立了井筒压力、井壁稳定及溢流控制理论新认识，现场应用证明欠平衡控压优于国际通行的微过平衡控压，更加精细安全，应用领域大幅拓展。通过可控微溢流控压钻井同时解决了发现与保护储层、提速增效及防止窄密度窗口井筒复杂的世界难题，为国际首创。

(4) 发明了控压钻井工况模拟装置及系统评价方法。该装置可完成井底与井口压力模式、主备阀切换、高节流压力工作模式、模拟溢流、漏失、溢漏同存的控压钻进等 10 类测试；属国内外首创，实现了对控压钻井工艺与装备的测试与评价，为产品质量、安全生产和规模应用提供了重要保障。

中国石油集团工程技术研究院有限公司于 2010 年研发了控压钻井系统 PCDS (Pressure Control Drilling System, PCDS)，2012 年，精细控压钻井装备与技术，获国家重点新产品、国家优秀产品奖、中国石油十大科技进展，2013 年，精细控压钻井装备与技术，获省部级科技进步特等奖，2014 年，精细控压钻井装备与技术，获中国石油自主创新重要产品，2015 年，精细控压钻井装备与技术，获中国专利优秀奖，2016 年，精细控压钻井装备与技术，获中国石油“十二五”十大工程技术利器。

中国石油集团工程技术研究院有限公司在精细控压钻井方面取得了以下创新性成果：

(1) 首创了控压钻井工况模拟装置及系统评价方法，实现了对控压钻井工艺与装备的测试与评价，为产品质量、安全生产和规模应用提供了重要保障。控压钻井工况模拟装置成为油气钻井技术国家工程实验室重要组成部分。

① 创新形成一种全尺寸控压钻井实验模拟水力模型设计方法，建立了控压钻井室内模拟理论基础。

为了使控压钻井实验模拟更接近钻井现场，攻克深井、复杂井的各种工况模拟技术，如循环钻进、起钻、下钻、接单根、井涌、井漏等实验模拟难题，建立了考虑压力、排量模拟相似性及环空摩阻各要素、井筒弹性效应的水力模型，形成多种工况的模拟方法，实现了复杂工况条件下流量、出入口压力差和节流阀开度控制及优化，获得最佳压力、流量控制方法。

② 创新形成一种全尺寸控压钻井实验模拟系统设计方法，建立了控压钻井室内实验模拟系统，建立了油气钻井技术国家工程实验室的分实验室——控压钻井实验室，如图 1-1 所示。



图 1-1 控压钻井实验室

由于钻井现场条件有限，装备应对井下异常情况无法客观随机存在，因此必须建立一种全尺寸实验模拟系统以方便设备实验、测试及调试，突破传统的“比例模拟”发展成全尺寸的“体积模拟”，建立了变频高压钻井泵组、环空压耗模拟、控制管汇以及中央控制等系统，由硬件系统提供基础工况模拟及参数，软件模拟控压钻井需要的参数，包括井底、设备、钻井及录井信息，以便装备调试、实验。

该实验模拟系统可完成 10 类测试方法，属国内外首创，包括井底压力模式、井口压力

模式、井底模式与井口模式切换、井口模式与井底模式切换、主备节流阀切换、高节流压力下井底与井口工作模式及模拟溢流、漏失、溢漏同存的控压钻进测试,可以实现各参数的自动标定、采集、处理等。

(2) 自主研发国内首套精细控压钻井大型成套工艺装备,压力控制精度 0.2MPa 以内,技术指标优于国际同类产品先进水平,填补了国内空白。

① 攻克了井下复杂识别、环空压力随钻测量和压力非线性控制等技术难题,研发具有独立知识产权的精细控压钻井大型成套装备,建立加工及现场操作标准。

自主研发集恒定井底压力控制与微流量控制于一体的精细控压钻井大型成套装备,包括自动节流、回压补偿、监测及自动控制、井下随钻测量、实时水力计算及控制软件等系统。集成了井底压力测量、地面参数监测、控压钻井水力计算模型、设备在线智能监控与应急处理功能,各系统可独立运行,也可组合使用,实现了 9 种工况、4 种控制模式切换、13 种应急转化的精细控制,即钻进、接单根、起钻、下钻、换胶心等 9 种工况,本地手动、自动及远程手动、自动 4 种控制模式,随钻测压工具、回压泵、自动节流管汇等失效及井口套压异常升高、严重溢流、井漏等 13 种应急转换的精细控制。

② 创新形成多策略、自适应的环空压力闭环监测与优化控制技术,有效降低控压钻井操作的难度和复杂性,保障了作业安全,提高作业效率。

根据精细控压钻井技术流程的要求,进行数据采集和通信获取实时地面及井下参数,分析钻进、接单根、起下钻等不同工况的变化以及井底压力、钻井液流量和井口压力的改变,建立一套系统的自动控制流程,在此基础上形成自适应控制模型,通过闭环监控系统实现参数采集、计算、分析,给出控制参数,执行闭环监控:反馈—分析决策—控制—反馈,即泵、节流阀、平板阀、仪器仪表等基础测量元件为反馈层,实时高速水力计算模型+工况判别方法+异常处理机制为分析决策层,液气电控制系统为控制执行层,实现了自动、闭环、自适应的井筒压力控制。

(3) 创新形成集钻井、录井、测井于一体的控压钻井方法,实现了精细控压作业现场数据一体化采集、处理与实时控制,建立了触发量与状态量警报机制与压力、流量双目标控制技术,在井下复杂预警时间和水平段延伸能力上取得突破。

① 建立了井下压力、温度参数采集和地面钻井液循环系统综合参数通信、处理、决策技术,突破国内外多家录井、工程、井下参数测量公司的不同数据格式、通信协议的技术壁垒,实现了多种形式参数的通信、处理、实时决策,深井井下复杂预警时间较常规钻井提前 10min 以上,作业安全性极大提高。

井控安全要求分秒必争,常规钻井往往是井下复杂反应到地面才能判断、确定,但已失去最宝贵时机,通过测量分析井下及地面压力、钻井液出入口流量并进行预校正,判断循环体系压力、流量平衡状态,准确判断溢流、漏失量,实现了 0.1m<sup>3</sup>内报警,并根据立管压力、钻压、机械钻速等工程参数及实时水力模型预测开展联合分析,确定井底与地层压力差的变化关系及井下溢、漏性质,实时进行压力、流量的补偿、控制,实现井下压力流量平衡钻井,让井下复杂在井底就开始识别、控制,给井控安全上了一把“安全锁”。

② 独创了融合井筒压力、流量双目标监测控制钻井技术,有效解决了碳酸盐岩水平井

段压力控制难题,水平段延伸能力平均提高 210%,显著提高单井产能。

深入分析控压钻井井筒压力传播规律以及井口压力变化,确定压力传播至井底时间及对井底压力大小的影响,井底压力与地层压力差导致循环钻井液总体积发生变化,建立了井底压力变化与钻井液进出口流量差之间的关系,形成一套压力与流量监控结合的双目标控制方法及流程(表 1-1)。

表 1-1 井筒压力、流量双目标监测、控制钻井技术框架

出入口流量差 $\Delta Q$	策略及目标	压力控制方式
瞬时量(微量)	根据瞬时量进行信号分析	实时记录流量变化的特征时间及对应工况和参数,根据实时水力模型计算所需井口压力,闭环压力控制,必要时进行人工干预,调整井口回压
平均量(平衡量)	校正钻井泵上水效率	
累积量(积分量)	校正流量计计量,真实反映溢流、漏失量	

突破了由于碳酸盐岩地层缝洞发育造成的压力分析、实时控制算法及防溢、控漏等多个技术难题,研发了贴近缝洞结构的顶部(压力敏感、易溢漏)“蹭头皮”式控压水平钻井技术,将精细控压钻井与水平井技术有机融合,在现场实践中使水平段延伸能力平均增加 210%,显著提高了单井产能。

自主研发的精细控压钻井技术相对国际先进水平,现场应用效果显著(表 1-2),取得多项纪录:塔中 721-8H 井,国内碳酸盐岩储层水平段 1561m、目的层钻进单日进尺 150m 最高纪录,且连续多日进尺过百米;塔中 862H 井,创造垂深大于 6000m、完钻井深 8008m 的世界最深水平井新纪录。

表 1-2 碳酸盐岩地层应用国产 PCDS 精细控压钻井实施效果

钻井方式	平均漏失量 ( $m^3$ )	复杂时间 (h)	平均水平段长度 (m)	平均日进尺 (m)	机械钻速 (m/h)
常规钻井	2429	427.2	215	12.29	2.36
引进国外控压技术钻井	69.98	45.2	466.13	22.02	2.41
国产 PCDS 精细控压钻井	16.4	0	1272	40.16	3.73

③ 发明了一种井筒动态压力实时、快速、精确计算方法,通过环空压耗和井口回压两种校核方法,解决了溢流或漏失导致气液两相流或多相流计算难题。

传统井筒压力计算通常利用气液两相流或多相流理论,通过划分不同流型,求解气液两相连续性方程和动量方程来实现,误差较大,难以满足压力敏感地层精细控压钻井的需求,因此利用井下随钻压力测量工具测量井底压力,实时水力模型计算预测井底压力;然后通过测量的井底压力以及预测的井底压力自动实时校正钻井井筒压力以实现精确控压钻井,该方法弥补了传统钻井井筒压力计算处理方法与井下实际压力误差较大的不足,可以更加快速精确地实时计算井筒压力,实现在窄密度窗口地层井筒动态压力的准确计算、实时校正与控制,达到良好的井底压力控制要求。

(4) 首次突破国际上控压钻井采用微过平衡的作业理念,率先开展欠平衡控压钻井应用,创新形成欠平衡精细控压钻井工艺;建立了井筒压力、井壁稳定及溢流控制理论新认

识,同时解决了发现与保护储层、提速增效及防止窄密度窗口井筒复杂的世界难题,为国际首创。

① 建立欠平衡控压钻井理论新认识,形成可控微溢流控压钻井新方法,为塔里木奥陶系台内礁滩地质发现新增地质储量油  $5000 \times 10^4 \text{t}$ 、气  $150 \times 10^8 \text{m}^3$  提供了重要的技术支撑。

国际上控压钻井是略过平衡压力控制钻井,在一定程度上限制了控压钻井的应用。另外,常规欠平衡钻井技术应对井下压力复杂能力不足,特别是常规欠平衡钻井技术应对窄窗口能力不足。为此,通过对地层压力和坍塌压力进行精确预测,确定一个介于坍塌压力和地层压力之间的合理井底压力值,进行可控微溢流欠平衡精细控压钻井,突破了井眼压力控制技术难题,避免发现溢流即关井,疑似溢流关井观察,实现了有控制的溢流,能最大限度保护和发现储层,提高钻速。

② 创新形成欠平衡溢流与重力置换溢流控制方法,攻克这两种典型溢流的理论分析难点,并建立相应的控制方法及边界条件,保证钻井安全。

对多种溢流发生原因进行分析,如岩屑破碎气、钻井液与地层气密度差进气、欠平衡进气等,建立了含液、气两相连续性方程及动量方程的控压钻井流动方程,根据井底压力、节点压力、节点气体速度等计算欠平衡压力实时控制参数;形成了欠平衡溢流与重力置换溢流判断方法、欠平衡溢流控制方法、重力置换溢流控制方法三种方法;明确了两种典型溢流安全控制范围,欠平衡溢流量在  $1 \text{m}^3$  以内,重力置换溢流量  $3 \text{m}^3$  以内。该技术在碳酸盐岩储层应用创造了多项新纪录,典型应用如塔中 26-H7 井,实现了目的层持续点火钻进,占总控压钻进时长的 80.4%,全过程“点着火炬钻井”;钻速明显提高,平均为  $4.23 \text{m/h}$ ;平均日进尺与常规钻井提高 103.7%。

## 第二节 控压钻井的类型、应用范围及特点

### 一、控压钻井的类型

国际钻井承包商协会欠平衡作业协会(IADC UBO Committee)控压钻井(MPD)子协会将控压钻井技术划分为两大类:被动型控压钻井和主动型控压钻井。

#### 1. 被动型控压钻井(Reactive MPD)

采用常规钻井方法钻井,钻井设计中安装控压钻井设备,钻井时能够迅速应对异常的压力变化,一旦有异常情况发生立即实行控压钻井。因此在钻井程序中至少需要装备有旋转控制装置(旋转防喷器)、节流管汇、钻柱浮阀等,以使该技术能够更加安全有效地控制难以预测的井底压力环境,如孔隙压力或破裂压力高于或低于预测值。

#### 2. 主动型控压钻井(Proactive MPD)

设计确定安装精细控压钻井设备,钻井时能够主动利用控制环空压力剖面这一优势,对整个井眼实施更精确的环空压力剖面控制。

控压钻井技术是为了更好地控制井底压力,其压力控制的目标是在整个钻井作业过程中无论是在钻进、循环钻井液、接单根、起下钻的作业过程中都能精确地控制井底压力,使其维持恒定。根据控压钻井的定义和类型,为了加强技术研究和生产组织,并节约科研和生产

资源配置, 笔者将控压钻井技术分为三大类, 见表 1-3。

表 1-3 控压钻井技术及相关配套技术分类

精细控压钻井技术	常规控压钻井技术	控压钻井相关配套技术
井底恒压控压钻井技术; 微流量控制钻井技术; 压力、流量双目标融合精细控压钻井技术	井口连续循环钻井技术; 阀式连续循环钻井技术; 双梯度控压钻井技术; 加压钻井液帽钻井技术; 充气控压钻井技术; 手动节流控压钻井技术; HSE 控压钻井技术; 简易导流控压钻井技术; 流量监测控压钻井技术; 降低当量循环密度工具	井身结构优化技术; 膨胀管和波纹管技术; 随钻环空压力测量装置; 地层压力测量装置; 优质钻井液技术; 化学方法提高承压能力技术; 高效防漏堵漏技术; 地层压力预测与实时分析技术; 井筒多相流分析技术; 控压钻井设计与工艺分析软件; 实验检测平台和评价方法

目前, 恒定井底压力的动态环空压力控压钻井可以实现井口回压自动控制, 并达到 0.2MPa 的控制精度; 微流量控压钻井可在涌入量小于 80L 时检测到溢流, 并可在 2min 内控制溢流, 使地层流体的总溢流体积小于 800L。

常规控压钻井技术是指达不到精细控压钻井的控制精度能力和控压钻井效果, 但是就目前技术水平而言, 可以在现场应用, 并达到常规控压钻井目的。关键是任一种常规控压钻井技术都要满足可以独立应用并具有控压钻井作业过程的专有技术。

控压钻井配套技术就是为精细控压钻井技术和常规控压钻井技术进行配套的特殊技术。

## 二、控压钻井的应用范围

随着海洋勘探开发规模的不断扩大, 以及陆地上对更深更复杂地层的勘探开发活动的日益增多, 控压钻井技术得到了越来越多的应用, 被认为是一项经济上可行的钻井技术。控压钻井技术可适用于窄密度窗口地层、压力枯竭油气田、致密气层、水平侧钻井、井眼不稳定及漏失层段、裂缝性或孔洞性储层、大位移井、小井眼井、高温高压深井超深井、海洋深水井等工况的钻井作业。

## 三、控压钻井特点及优势

控压钻井不同于常规的敞开式压力控制系统, 而是采用封闭的循环系统, 更精确地控制整个环空的压力剖面, 通过调节井眼的环空压力来补偿钻井液循环而产生的附加摩擦压力。控压钻井技术的重要特征就是使用了封闭的钻井循环压力控制系统, 可增加钻井液返出系统的钻井液压力, 在钻井作业的过程中, 保持适当环空压力剖面。防止了钻井液漏入地层, 造成对地层的伤害。以“防溢防漏”为主, 这种控制压力变化的工艺有更好地井控能力, 能更加精确地进行井眼压力控制, 同时能保持对返出钻井液的导流功能, 保证钻井顺利, 减少复杂情况。

正常情况下, 控压钻井是一种平衡和近平衡的钻井方式, 不会诱导地层流体侵入, 不同于常规过平衡钻井, 能消除很多常规钻井所存在的风险。该技术具有以下几个特点:

- (1) 以低于常规钻井的钻井液密度钻进, 避免压裂地层和钻井液漏失;

(2) 接单根时需在井口加回压,使接单根时的井底压力接近钻进时的井底压力;

(3) 使用闭合、承压的钻井液循环系统,也可使用欠平衡钻井设备,如可回收钻柱浮阀、井下套管阀等,以控制作业中可能出现的流体侵入。

控压钻井技术是从欠平衡钻井技术的基础上发展起来的新技术,是目前最安全的一种钻井方式。控压钻井的目标是解决一系列与钻井压力控制相关的问题,增强钻井作业的可靠性,降低经济成本。在美国的陆上钻井程序中,使用闭合、承压的钻井液循环系统钻井已成为陆地钻井技术的一个发展方向。更少的钻井非生产时间,更低的成本和更强的井控能力使其已经成为陆上钻井程序完美技术的关键标准。对钻井地质情况不清楚的油气井,在钻进的过程中能够根据需要更精确地进行压力控制,增强井控能力,减少调整钻井液密度的次数,减少非生产时间和钻井事故,使复杂井的作业变得更加容易。具体来讲,控压钻井技术主要有以下几方面的优势:

(1) 可以精确地控制整个井眼压力剖面,避免地层流体的侵入。

(2) 使用封闭、承压的钻井液循环系统,能够控制和处理钻井过程中可能产生的任何形式的溢流。

(3) 可以在接单根时加回压,确保关井压力接近循环和钻进时的井底压力,使井底压力恒定。

(4) 钻井能顺利通过窄密度窗口层段。

(5) 能避免井眼压力超过地层破裂压力,减少发生井漏、井塌等事故,减少处理井下事故的时间。

(6) 能解决裂缝性等复杂地层的漏失问题,减少易漏地层钻井液材料损失。

(7) 减少不稳定性地层失稳与垮塌问题,避免阻卡发生。

(8) 能优化井身结构,减少套管层次。

(9) 降低钻井液密度,提高钻速。

(10) 能减少井底压力波动,延伸大位移井或长水平段水平井的水平位移,减少对储层的污染与伤害,增加单井产能。

(11) 减轻对储层伤害、有利于储层发现;保护油气层、提高单井产量。

(12) 大幅度降低非生产时间,缩短钻井周期,从而降低钻井综合成本,提高经济效益。

控压钻井是一项具有精确的维持井底常压、避免当量循环密度超过井眼破裂压力梯度,减少发生井涌、井漏、井塌等事故,降低钻井综合成本,能更好地通过窄密度窗口等优点的技术,必将成为海上、陆上钻井广泛应用的一种安全钻进技术。

## 第二章 精细控压钻井工艺技术

精细控压钻井的压力控制目标是：在整个钻井作业过程中无论钻进，还是循环钻井液、停钻接单根，都能根据需要精确地控制井底压力，并使其维持恒定。根据不同的地质情况、不同的钻井要求，确定不同的控压钻井方式，采用不同等级应用技术。

### 第一节 精细控压钻井的基本原理

精细控压钻井通过装备与工艺相结合，合理逻辑判断，控制井口回压保持井底压力稳定，使井底压力相对地层压力保持在一个微过、微欠或近平衡状态，实现环空压力动态自适应控制。控压钻井的核心就是对井底压力实现精确控制，保持井底压力在安全密度窗口之内。井底压力等于静液柱压力、环空压耗和井口回压三者之和。精细控压钻井基本原理如图 2-1 所示。

在控压钻井设计计算中，既有单相流的计算，又有两相流的计算。其计算参考了环空水力学计算模型中的钻杆流动模型和环空流动模型，进行控压钻井的压力计算。在井口回压控压钻井的计算中，只有一种流体密度，属于单相流的计算模型，通过令两相流模型中的含气率为零，就可以使用两相流的模型进行单相流的计算。

精细控压钻井利用回压来控制井底压力是基于如下公式：

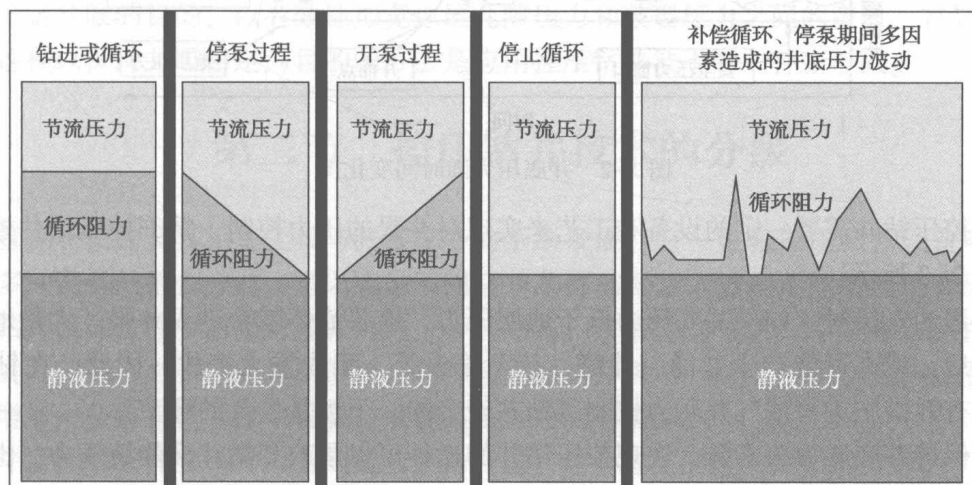
$$p_b = p_m + p_a + p_t$$

式中  $p_b$ ——井底压力，MPa；

$p_m$ ——钻井液静液柱压力，MPa；

$p_a$ ——环空压耗，MPa；

$p_t$ ——井口回压，MPa。



(a) 不同阶段压力变化

图 2-1 精细控压钻井基本原理示意图



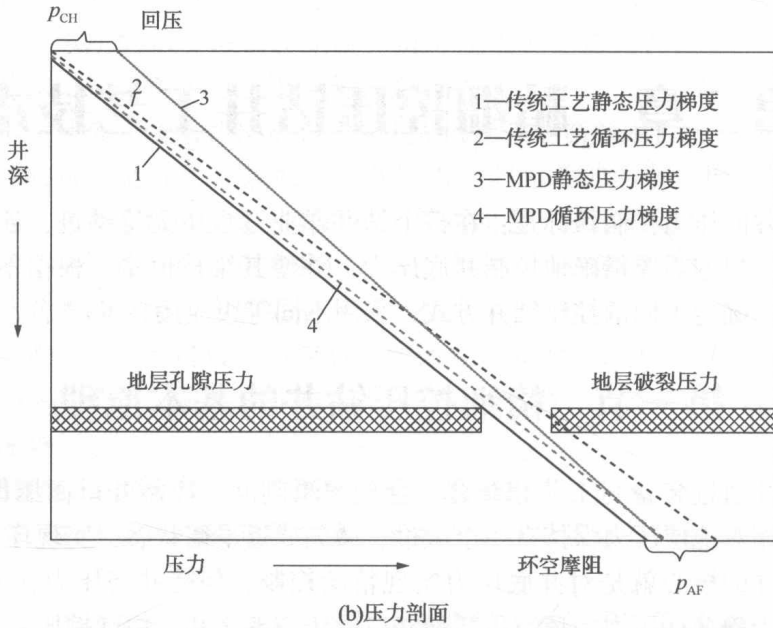


图 2-1 精细控压钻井基本原理示意图 (续)

为了保持井底压力为常量，就要改变井口回压  $p_i$  以补偿环空压力的改变，环空压力的变化主要有以下几个方面的原因：钻井泵的泵速、钻井液密度和其他一些引起压力瞬时改变的因素，如岩屑含量和钻具转速变化等。控压钻井采用的环空水力学计算，其目的是用来计算确定控压钻井所需要的井口回压值，以便在钻井过程中对井底压力进行控制。

为了确保井底压力在钻井作业过程中都能保持恒定，还需要使用自动控制系统，把计算机实时计算出的井口回压控制数据传输到控制系统，以实现井底压力快速自动调整，如图 2-2 所示。

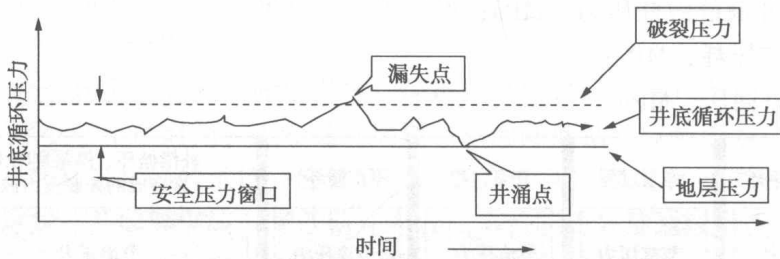


图 2-2 井底压力随时间变化图

精细控压钻井需要一定的设备和工艺来实现对井眼的压力控制，精细控压钻井控制工艺流程如图 2-3 所示。

当钻遇油气层时，如果井底压力低于地层压力，地层流体就会进入井眼。大量地层流体进入井眼后，就有可能产生井涌、井喷，甚至着火等，酿成重大事故。因此，在钻井过程中，采取有效措施进行油气井压力控制是钻井安全的一个极其重要的环节。

为了保持井底压力为常量，实现控压钻井的途径可以是改变钻井液静液压力，也可以是改变井口回压，还可以改变环空压耗，由此产生了不同类型的控压钻井方法。概括起来，控压钻井的压力控制的方法主要表现在两个方面：一方面，通过调节钻井液密度、井口回压、