

# 井底恒压式与微流量式控压钻井系统控制机理差异分析

姜英健<sup>1,2</sup>, 周英操<sup>1</sup>, 杨甘生<sup>3</sup>, 刘伟<sup>1</sup>

(1. 中国石油集团钻井工程技术研究院, 北京 100195; 2. 中国石油集团勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

**摘要:**随着我国能源需求的不断增加,大量深层和复杂油气藏需要进行开采,伴随而来的各种钻井复杂问题也越来越多,其中钻井安全密度窗口窄的问题就是最为突出的问题之一。控压钻井技术目前是解决该问题最有效的办法。控压钻井技术按照其控制原理又可分为井底恒压式控压系统与微流量控压钻井系统。通过对这2种控压钻井方式的基本工艺流程及装备进行分析,比较2种控压钻井系统区别,为进一步推广控压钻井技术提供建议。

**关键词:**控压钻井;井底恒压;微流量;窄密度窗口

中图分类号:P634.5;TE249 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2014)05-0006-04

**Analysis on Different Control Mechanism of Constant Bottom Hole Pressure Drilling System and Micro-flux Control Drilling System/**JIANG Ying-jian<sup>1,2</sup>, ZHOU Ying-cai<sup>1</sup>, YANG Gan-sheng<sup>3</sup>, LIU Wei<sup>1</sup> (1. Drilling Research Institute, CNPC, Beijing 100195, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing 100083, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Because of the increasing energy need in China, a lot of deep and complex reservoirs are to be exploited with more and more complex problems in drilling. The narrow safety density window of drilling fluid is one of the most prominent problems. MPD technology is the best way to solve this problem currently, which can be divided into constant bottom hole pressure system and micro-flux control system. By the analysis on these two basic styles of processes and equipments, the difference between these two systems is compared in order to provide recommendations for the further promotion of MPD technology.

**Key words:** manage pressure drilling; constant bottom hole pressure; micro-flux; narrow density window

## 0 前言

窄密度窗口通常定义为钻井过程中的环空循环压耗大于或等于地层孔隙压力与破裂压力之差,这就给钻井液密度选择和安全钻进带来了挑战<sup>[1]</sup>。目前最适宜在窄密度窗口地层作业的钻井技术是控压钻井技术<sup>[2]</sup>。控压钻井技术具体来说,是通过对井口套管压力、钻井液密度、水力摩阻等的综合控制,精确控制整个井眼环空压力剖面,使整个井筒的压力稳定地维持在地层孔隙压力和破裂压力之间,从而有效控制地层流体侵入井眼。减少井涌、井漏、卡钻等多种钻井复杂情况。美国在1995年之前,控压钻井技术使用率不到钻井总数的10%,至2008年,控压钻井技术使用率已超过55%,目前,美国陆地钻机的75%已配备了控压钻井装备。2004~2007年,国外海洋钻井实施了50余次控压钻井作业,作业区域主要位于亚太地区,还包括委内瑞拉、北海、墨西哥湾和巴西等国家,解决了这些地区裂缝性地层漏失严重的问题,减少了钻头使用数量,优化了井身结构,减少或避免了井下复杂问题的普遍发

生,并在一定程度上保护了油气层。在钻进、接单根、起下钻时均保持恒定的环空压力剖面,在钻进孔隙压力与破裂压力窗口狭窄的地层或存在涌漏同存现象时,可实现有效的压力控制<sup>[3]</sup>。避免压裂地层或发生井涌,这样就可以安全地钻过狭窄的密度窗口。

目前国际上比较成熟的控压钻井系统主要有Halliburton公司的控压钻井系统(Manage Pressure Drilling, MPD),Schlumberger公司的动态环空压力控制系统(Dynamic Annular Pressure Control, DAPC)和Weatherford公司的微流量控压钻井(Micro-Flux Control, MFC)系统。DAPC系统与MPD系统工作原理基本相同,均属于井底恒压式控压钻井,所以本文只以DAPC系统为例与MFC系统进行对比。

## 1 DAPC系统与MFC系统的主要结构及工作原理

### 1.1 DAPC系统

Schlumberger公司的DAPC系统主要包含旋转防喷器、控压自动节流管汇、控制面板与PLC(MPD Auto

收稿日期:2013-11-27

基金项目:国家科技重大专项“窄密度窗口安全钻井技术与配套装备”(2011ZX05021-003)

作者简介:姜英健(1986-),男(汉族),山东烟台人,中国石油集团勘探开发研究院博士研究生,油气井工程专业,主要从事控压钻井及井筒压力控制方面的研究工作,北京市海淀区学院路20号59号楼培训中心(100195),jiangyingjian1986@126.com。

choke、Control Panel and PLC)、回压泵 BPP (Back-Pressure Pump)、数据采集和控制系统(Data Acquisition and Control System)、随钻测压(PWD)以及配套的自动控制系统,附加管汇等(图1)。该系统通过高速网络把泵、节流管汇和实时精确的水力学模型连接成一个系统,可以自动地测量、管理和控制井下压力。通过高速网络把泵、节流管汇和实时精确的水力学模型连接而成,可以自动地测量与控制井下压力<sup>[4]</sup>。

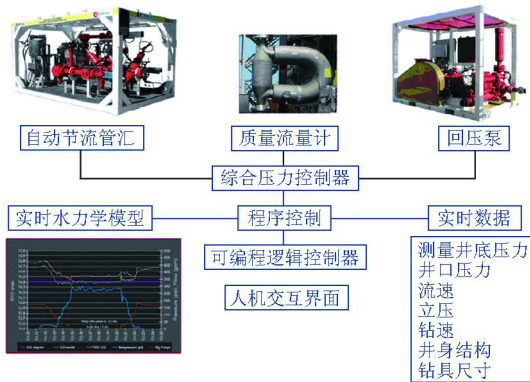


图1 Schlumberger 公司 DAPC 系统主要结构

钻井时,井下复杂的产生大多是因为井底压力与地层压力相差较大,漏失产生的原因为井底压力大于地层破裂压力,溢流产生的原因井底压力为小于地层压力。在钻井过程中,井筒内压力平衡方程式可表达为:

$$P_{BHP} = P_{WHP} + P_H + P_L \quad (1)$$

式中: $P_{BHP}$ ——地层压力,MPa; $P_{WHP}$ ——井口回压,MPa; $P_H$ ——静液柱压力,MPa; $P_L$ ——环空压耗,MPa。

而 DAPC 控压钻井系统利用综合压力控制器、水力学模型、节流管汇、回压泵协同工作,通过实施计算,自动调整井口回压,能够在钻进、接单根、起下钻等过程保持井底压力在合适的密度窗口之内,避免或减少井涌、井喷、漏失等事故的发生,特别适合用于解决窄安全密度窗口和高温高压地层钻井所出现的涌漏同存、高压井控风险难题。井底恒压控压钻井技术流程如图2所示。

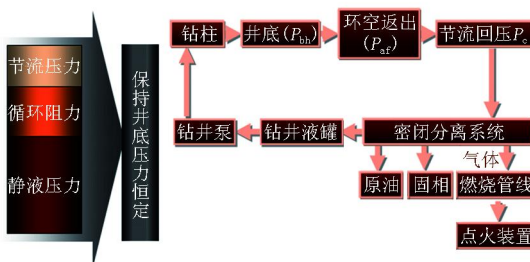


图2 井底恒压控压钻井技术流程简图

### 1.2 MFC 系统

Weatherford 的微流量控压钻井系统 (MFC) 的出入口流量监测和早期溢流探测方法的美国专利早于 Halliburton 公司的控压钻井系统,其设计目标是<sup>[5]</sup>:(1)最大程度的减少钻机附加设备;(2)通过在地面上操作可以快速实现井下控制;(3)在任意时间均能直接确定地层孔隙压力和破裂压力;(4)钻井工人在地面上简单的操作便可灵活的改变当量循环密度;(5)在需要时能够迅速的切换回常规钻井方法;(6)能够显著降低钻风险井的费用;(7)操作简单快捷,能够达到全自动运行;(8)不需要再增加和研发其他昂贵的设备。MFC 系统是通过在传统的地面钻井液循环环路上安装微流量传感器和节流装置来实现对钻井液压力、流量、当量循环密度、流速等参数的随钻实时监控,并同时反馈控制,最终达到控压钻井的目的。微流量控压钻井系统主要结构分为3个部分:旋转控制头,微流量节流管汇和数据采集与控制系统,其基本结构如图3所示。

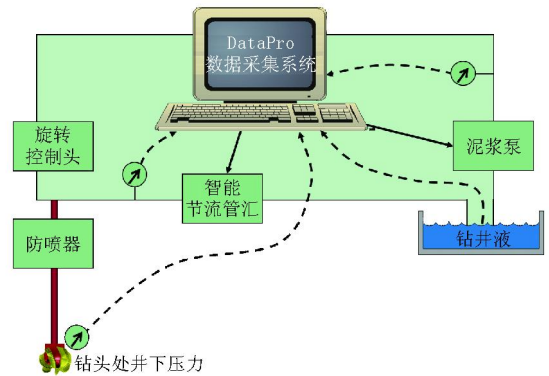


图3 MFC 系统基本结构示意图

微流量的含义包括了微进口流量和微出口流量2个概念,对微流量的精确检测和控制是保证钻井液闭环控制的基础。系统采用了高精度的质量流量计,所以能够监测到钻井液很小的波动范围。微流量控压钻井系统只需在地面进行简单的操作便可以快速控制钻井液压力。在实际工程应用中,可假设环空内的钻井液为不可压缩流体,所以地面控制单元的任何微小压力变化都将在环空中得到快速响应,这是 MFC 系统能够满足快速控制要求的基础。

钻井作业时连续不断的注入钻井液,利用井筒的液柱压力来平衡地层中的油、气、水压力和岩石的侧向压力,以防止井喷、井塌、卡钻和井漏等井下复杂情况的发生。不同井段和工况下可计算出钻井液参数的安全范围。系统控制软件通过传感器将采集到的钻井液流量、压力、温度等采样值通过模数转换送入

到中央数据采集与控制系统中,并与安全范围进行比较,若超出了安全范围值,系统进一步判断钻井液是否存在漏失情况。如果有漏失发生,系统便可确定压裂地层,调整流量减少回程压力达到平衡状态;若无漏失情况发生,则确定孔隙压力,改变流量增加回程压力,直至达到期望的钻井液流量值。微流量控压钻井工艺流程如图4所示。

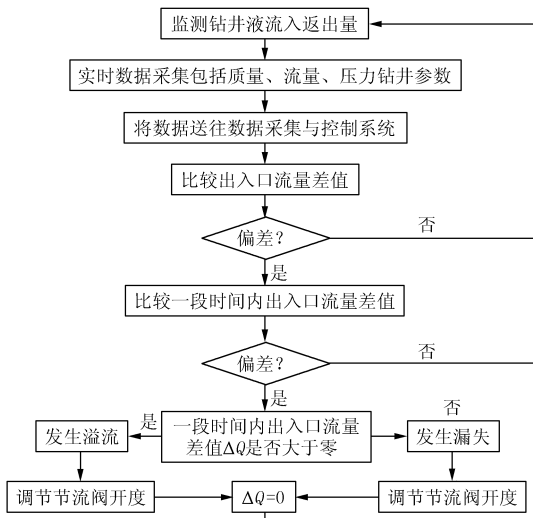


图4 微流量控压钻井工艺流程

在整个钻井施工过程中,这种检测与比较会一直进行下去,完成钻井时钻井液的可控循环,实时调节孔隙压力和破裂压力,来满足钻井工艺的要求。该系统能精确检测泵入和返出的钻井液的质量流量、密度、粘度、温度等参数,能在井涌量 < 80 L 时就能检测到,并可在 2 min 内控制溢流,使地层的流体的总溢流体积 < 800 L。该套系统不一定需要 PWD 工具,应用微流量控制原理和技术实施控压钻井,只需对钻机结构做部分改进,在传统的钻井液循环管汇上安装精确的传感器和钻井液节流装置,对进出口钻井液的微小压力、质量流量、当量循环密度、流速等参数进行实时监测,钻井工程人员在地面可以通过简单的操作即可快速改变钻井液的特性,以满足钻井工艺要求,预防和解决钻井事故的发生<sup>[6-8]</sup>。该技术控制程序简单,可与常规钻井方式相互切换,便于操作,提高了钻井效率和钻井安全。该系统能快速检测地层压力,并保持井底压力的稳定,与 DAPC 系统的控压思路有所区别。

## 2 DAPC 系统与 MFC 系统的主要区别

总体来说,2 种控压钻井系统均是通过调节节流管汇,施加回压,来达到节流压力、循环摩阻与静液压力三者之和动态的恒定。综合分析 2 套控压钻井系

统的工作原理及基本机构,可以发现 2 系统的主要区别主要有以下几方面。

### 2.1 设备组成不同

两套系统均包含有高精度的节流管汇、回压泵、多相分离装置、可回收的钻柱单向阀 NRV、质量流量计(Coriolis 流量计)、体积流量计、温度和压力传感器等设备;不同的是 DAPC 系统有时需要使用随钻测压工具 PWD 来实时测量井底压力,并传递给数据采集和控制系统,经判断分析后对下步控压进行修正;MFC 系统则不需要随钻测压工具 PWD,该系统井口有一套质量流量计与体积流量计、能确定早期微流量侵入的探测设备,如 WMB 的碳氢化合物探测器等<sup>[9]</sup>。MFC 系统是通过检测进出口的流量变化,经水力学计算来获得井底压力数值。

### 2.2 监测目标及控制策略不同

DAPC 系统需要安装随钻测压工具 PWD,其直接监测对象为压力。其控制策略是力的平衡原理,通过对回压、流体密度、流体流变性、环空液位、水力摩阻和井眼几何形态的综合精确控制,使节流压力、循环摩阻与静液压力三力之和达到稳定状态,从而使整个井筒的压力精确地维持在安全密度窗口内。

MFC 系统的直接监测对象为流量,其控制策略是物质守恒原理,是通过在传统的地面钻井液循环线路上安装微流量传感器和节流器来实现对钻井液压力、流量、当量循环密度、流速等参数的随钻实时监控,并同时反馈控制,使井筒内流体的量维持恒定,最终达到控压钻井的目的<sup>[10]</sup>。

若假定井筒内流体为气液两相,分别考虑钻柱内和环空内的平衡方程(参见图5)。

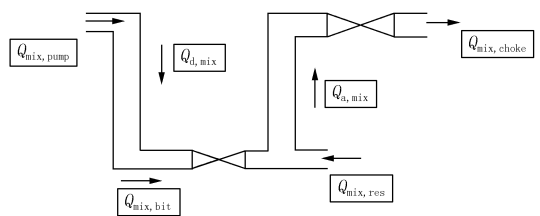


图5 井筒质量平衡示意图

钻柱内平衡方程:

$$\frac{d}{dt} m_{g,d} = Q_{g,pump} - Q_{g,bit} \quad (2)$$

$$m_{g,d}(0) = m_{0,g,d} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} m_{l,d} = Q_{l,pump} - Q_{l,bit} \quad (4)$$

$$m_{l,d}(0) = m_{0,l,d} \quad (5)$$

其中,下标 g 代表流体中气相部分,下标 l 代表

流体中液相部分,  $Q_{1,bit}$  为钻头处流体的流量。

环空中平衡方程:

$$\frac{d}{dt}m_{g,a} = Q_{g,bit} + Q_{g,res} - Q_{g,choke} \quad (6)$$

$$m_{g,a}(0) = m_{0,g,a} \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt}m_{l,a} = Q_{l,bit} + Q_{l,res} - Q_{l,choke} \quad (8)$$

$$m_{l,a}(0) = m_{0,l,a} \quad (9)$$

其中,下标  $g$  代表流体中气相部分,下标  $l$  代表流体中液相部分,  $Q_{l,res}$  为地层内流体的流量,  $Q_{l,choke}$  为出口节流阀处的流体流量。

### 2.3 小结

综上所述,DAPC 系统与 MFC 系统均能提供井底恒压式的控压钻井服务,只是在设备及工作原理上有些许不同。比较两套控压系统,并无高下优劣之分,只是侧重点有所区别。装有随钻测压工具 PWD 的 DAPC 系统能够精确的测量井底压力,而装有先进的质量流量计与体积流量计的 MFC 系统能够更早地探测和更精确地控制各种事故的发生。

## 3 应用及研究进展

2 套控压系统目前均已成功地投入商业应用。DAPC 系统于 2005 年商业应用于墨西哥湾 Mars 区块海洋钻井,解决了钻井中出现的井漏和井眼失稳问题;2007 年成功用于北海 Kvitebjørn 高温高压开发井的钻进作业。四川油田和大港油田也分别引进了 MFC 系统,其中大港油田的滨 41 井应用 MFC 系统控压钻进井段 3380 ~ 4450 m,全程未发生井漏和溢流,钻井液密度得到了有效控制,储层段平均机械钻速是邻井的 2 倍,钻井周期得到大幅缩短,取得了良好的效果<sup>[11]</sup>。

近年来,国内也加强了对控压钻井技术的研究,中国石油集团钻井工程技术研究院研制的 PCDS-I 精细控压钻井系统具备井底恒压和微流量控制双功能,先后在我国塔里木、川渝、华北、冀东等地区成功进行了现场试验和应用 10 余口井,形成了过平衡、近平衡、欠平衡精细控压钻井技术,实现了减轻对地层伤害、解决窄压力窗口问题、有效地减少或降低井漏、井涌、压差卡钻等复杂、延长水平井段长度、提高机械钻速、增加钻井安全性、控制或避免井下涌漏等复杂、处理井下涌漏复杂等显著应用效果<sup>[12,13]</sup>。

## 4 结论与建议

(1) DAPC 系统与 MFC 系统都能提供井底恒压

式的控压钻井技术,均是通过调节节流管汇,施加回压,来达到节流压力、循环摩阻与静液压力三者之和动态的恒定,来实现控压钻井的目的。

(2) DAPC 系统安装有随钻测压工具 PWD,其直接监测对象为压力。能够精确的测量控制回压、井底压力等参数。

(3) MFC 系统进出口处均装有先进的质量流量计与体积流量计,因而能够更早地探测和更精确地控制涌漏情况的发生。

(4) 鉴于控压钻井技术的诸多优势,建议继续加大控压钻井新技术的适应性试验及推广应用力度,进而解决复杂地层钻井经常钻遇的钻井难题,降低非生产作业时间,节约钻井成本,实现安全钻井。

### 参考文献:

- [1] 周英操,杨雄文,方世良,等. 窄窗口钻井难点分析与技术对策[J]. 石油机械,2010(004):1-7.
- [2] 周英操,崔猛,查永进. 控压钻井技术探讨与展望[J]. 石油钻探技术,2008,36(2):9.
- [3] MALLOY K, STONE R, MEDLEY G, et al. Managed-Pressure drilling: what it is and what it is not [C]. M paper122281 - MS presented at the IADC/SPE Managed Pressure Drilling and Under-balanced Operations Conference & Exhibition, 12 - 13 February 2009, San Antonio, Texas, USA. New York: IADC/ SPE, 2009.
- [4] SANTOS H, REID P, MCCASKILL J, et al. Deep-water drilling made more efficient and cost-effective; using the micro flux control method and an ultralow-invasion fluid to open the mud weight window [J]. SPE Drilling & Completion, 2007, 22(3): 189 - 196.
- [5] SANTOS H, REID P, LEUCH TENBERG C, et al. Micro flux control method combined with surface BOP creates enabling opportunity for deep water and offshore drilling [C]. M paper 17451 - MS presented at the Offshore Technology Conference, 2 - 5 May 2005, Houston, Texas, USA. New York: SPE, 2005.
- [6] SANTOS H, MUIR K, SONNEMANN P, et al. Optimizing and automating pressurized mud cap drilling with the micro-flux control method [C]. M paper 116492 - MS presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 20 - 22 October 2008, Perth, Australia. New York: SPE, 2008.
- [7] 周英操,崔猛,查永进. 控压钻井技术探讨与展望[J]. 石油钻探技术,2008,36(4):1-41
- [8] 王果,樊洪海,刘刚,等. 控制压力钻井技术应用研究[J]. 石油钻探技术,2009,37(1):34-38.
- [9] 曾凌翔,李黔,梁海波,等. 控制压力钻井技术与微流量控制钻井技术的对比[J]. 天然气工业,2011,31(2):82-84.
- [10] 朱丽华. 控制压力钻井技术与欠平衡钻井技术的区别[J]. 钻采工艺,2008,31(5):136.
- [11] 周宝义,窦同伟,孙宝,等. 微流量控制控压钻井技术在大港油田的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量,2012,(9):80-82.
- [12] 周英操,杨雄文,方世良,等. 国产精细控压钻井系统在蓬莱 9 井试验与效果分析[J]. 石油钻采工艺,2011,33(6):19-22.
- [13] 石林,杨雄文,周英操,等. 国产精细控压钻井设备在塔里木盆地的应用[J]. 天然气工业,2012,32(8):6-10.