

# 井底恒压控制压力钻井技术

张广垠<sup>1</sup>, 杨顺辉<sup>2</sup>, 赵向阳<sup>2</sup>, 豆宁辉<sup>2</sup>, 夏柏如<sup>1</sup>

1. 中国地质大学工程技术学院, 北京 100083
2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101

**摘要** 近年来控制压力钻井(MPD)由于能有效降低井下复杂、事故情况的发生,减少非生产时间,非常适合复杂地层的钻进,在国内外油田开发复杂地层钻井施工中得到了飞速发展。目前井底恒压控制压力钻井(CBHP MPD)是最常用的一种控制压力钻井方式,大约占总工作量的80%以上。本文首先对井底恒压控制压力钻井的适用范围、优点和关键技术进行了分析,然后详细分析了目前的解决方案和技术现状,包括回压泵加节流管汇控制法、连续循环系统(CCS)控制法、连续循环阀(CCV)控制法、注气稳压方式以及目前国内外最先进的全自动智能控制压力钻井系统,并对该项技术今后的发展提出了建议。

**关键词** 控制压力钻井;井底恒压;节流管汇;连续循环系统

**中图分类号** TE242

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.14.014

## Key Equipment and Technology for Constant Bottom Hole Pressure MPD

ZHANG Guangyin<sup>1</sup>, YANG Shunhui<sup>2</sup>, ZHAO Xiangyang<sup>2</sup>, DOU Ninghui<sup>2</sup>, XIA Bairu<sup>1</sup>

1. School of Engineering & Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China

**Abstract** In recent years, the MPD technology sees a rapid development both at home and abroad because it can effectively reduce the downhole troubles and accidents, reduce the non-productive time, and is very suitable for the complex formation drilling operation during the oilfield development. Currently, the constant bottom hole pressure managed pressure drilling (CBHP MPD) is the most commonly used managed pressure drilling technique, covering more than 80% of the total usage. The paper analyzes first the scope of the applications, the advantages and the key technologies of CBHP MPD, and then the current solution and the technical status, including the back pressure pump and the choke control method, the Continuous Circulating System (CCS) control method, the Continuous Cycle Valve (CCV), the injecting gas stable pressure and the fully automatic intelligent managed pressure drilling system. Finally, the paper puts forward some proposals for the development of the managed pressure drilling technology in the future.

**Keywords** MPD technology; constant bottom hole pressure; chock manifold; CCS

### 0 引言

随着石油、天然气勘探开发的不断深入,复杂地层、深井、深水的钻探越来越多,压差卡钻、溢流、漏失等复杂钻井情况经常发生,特别是由窄密度窗口(孔隙压力和破裂压力相差较小)引起的复杂情况处理更是占用了大量的非生产时间,而控制压力钻井(MPD)技术的出现能有效降低井下复杂情况的发生、减少非生产时间,非常适合复杂地层的钻进,因此近年来该项技术在国内外得到飞速发展<sup>[1-3]</sup>。MPD技术根据应用类型可分为井底恒压控制压力钻井(CBHP MPD)、泥浆

帽控制压力钻井(PMCD)、双压力梯度控制压力钻井(DGMPD)及健康、安全、环保控制压力钻井(HSE MPD)4种类型。其中,泥浆帽控制压力钻井主要应用于恶性、失返性漏失的地层,双压力梯度控制压力钻井主要用于海上钻井,健康、安全、环保控制压力钻井主要用于含硫化氢井的钻井,而井底恒压控制压力钻井可广泛应用于陆地和海上大部分复杂地层的钻进,是最常用的一种控制压力钻井方式,大约占到控制压力钻井总工作量的80%以上,本文重点分析这种控制压力钻井技术。

收稿日期:2013-01-22;修回日期:2013-02-22

作者简介:张广垠,高级工程师,研究方向为海外欠平衡钻井、控制压力钻井、油气层保护等钻井技术,电子信箱:gyzhang.sipc@sinopec.com

### 1 井底恒压控制压力钻井的适用范围、优点和关键技术

井底恒压控制压力钻井主要用于窄密度窗口地层的钻井,由于地层密度窗口较小,经常发生循环时漏失,停泵后溢流的现象,很难找到合适的钻井液密度。而井底恒压控制压力钻井能有效改变环空的压力剖面,可以很好地解决这个问题。常规钻井方式与井底恒压控制压力钻井方式井下压力分布主要有如下区别。

常规钻井方式

$$P_w = P_H + P_{AF} \quad (1)$$

井底恒压控制压力钻井方式

$$P_w = P_H + P_{AF} + P_{CH} \quad (2)$$

其中,  $P_w$  为井底压力,  $P_H$  为环空液柱产生的静压,  $P_{AF}$  为钻井液环空摩阻,  $P_{CH}$  为井口施加的回压。

该技术在钻井作业过程中使用钻井液密度低于传统工艺,循环过程中井底压力等于环空摩阻与静液压力之和;停止循环时,环空摩阻压力由井口施加回压补偿,从而保持井底压力的恒定。使得井底压力始终保持在地层孔隙压力和破裂压力之间,保证井既不涌也不漏(图1)。

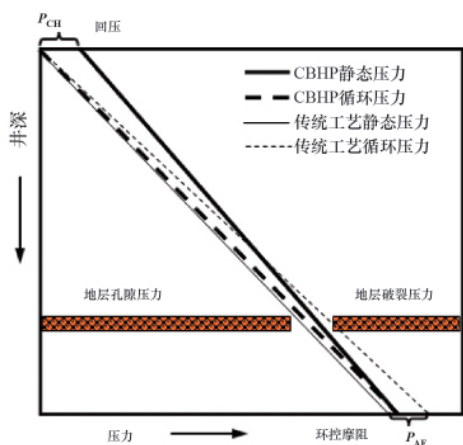


图1 井底恒压控制压力钻井方式和常规钻井方式对比  
Fig. 1 Comparison between CBHP MPD and conventional drilling

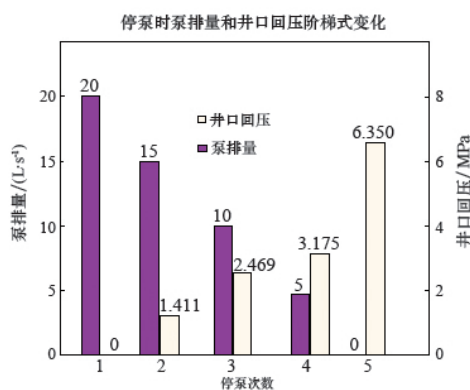
从上面的分析可以看出,井底恒压控制压力钻井的技术关键在于在钻进过程、接单根过程、甚至起下钻过程中都保持井底压力的恒定,在实际作业过程中,常采用回压泵加节流管汇控制法、连续循环系统(CCS)控制法、连续循环阀系统(CCV)控制法、注气稳压控制方式、全自动智能控制压力钻井系统5种方式实现井底恒压<sup>[1-6]</sup>。

### 2 回压泵加节流管汇控制法

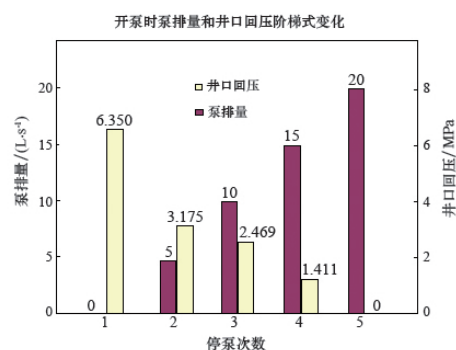
目前最常用的方式是回压泵加节流管汇控制法,回压泵可以是单独的柱塞泵,也可以采用井队的泥浆泵,接单根或起下钻时,通过回压泵将钻井液从压井管汇注入,经钻井四

通、节流管汇返回泥浆罐,通过调节节流阀的开度,控制回压的大小(钻杆通过安装在井口的旋转防喷器密封)。

根据井底压力基本不变、地面操作方便高效的原则制定停泵和开泵,随排量逐渐降低(停泵)和排量逐渐增加(开泵)井口加(停泵)、减(开泵)压的关系,停泵和开泵过程分5个步骤阶梯型调整排量和井口回压(图2)。也可以加密施工步数,进一步平缓井底压力的波动。



(a) 停泵时  
(a) Pump off



(b) 开泵时  
(b) Pumping

图2 不同排量下井口应减压力  
Fig. 2 Required decrease of the pressure value at different pumping rates

从操作工艺中可以看出,节流管汇性能的优劣直接关系到井底压力的平稳程度,目前按照国际上的划分标准,节流管汇已经进入了第3代。第1代为目前井队常用的节流管汇,通过手动调节节流阀的开度,从而控制回压;第2代为自动节流管汇,可以输入要控制的压力,系统自动调节节流阀的开度而控制回压,而且系统有自反馈功能,能够自动将回压稳定在输入值;第3代为智能型节流管汇,它有3种工作方式,第1种是水力学计算方式,通过水力学计算井底压力,实时调节回压泵的排量和节流阀的开度,保持井底压力的恒定;第2种是和井底压力测量仪器(PWD)进行实时通信,通

过实测得到井底压力数据,进而通过地面调节来保持井底压力的恒定;第3种是人工干预方式,通过地面输入要控制的回压值,由系统自动调节,相当于第2代自动节流管汇的功能。目前,国外的服务公司(Weatherford、Halliburton、Schlumberger)大部分都采用第3代智能型节流管汇,同时配合PWD进行控压钻井;国内节流管汇的应用大多数都是第1、2代,第3代产品的应用才刚刚起步。

### 3 连续循环系统控制法

美国 SWACO 公司发明的连续循环系统 CCS 是一个钻台上集密封、上卸扣、循环为一体的装置,类似于内置上卸扣钳头、外壳上带循环通道的闸板防喷器组合。通过 CCS 装置可以实现接单根过程中的连续循环<sup>[7-10]</sup>,如图 3 所示。

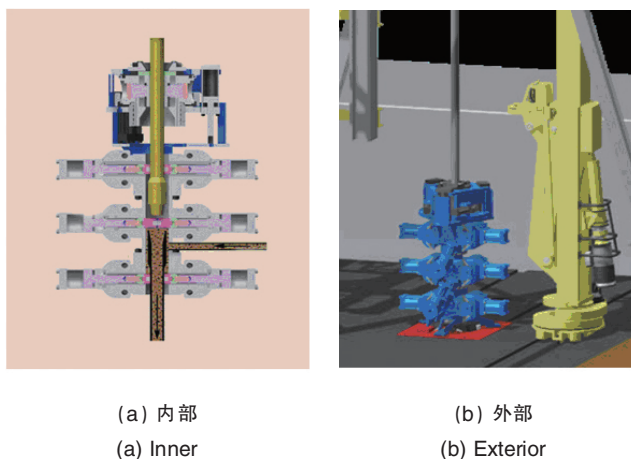


图 3 SWACO 连续循环系统  
Fig. 3 Continuous Circulation System of SWACO

连续循环系统的工作原理:采用顶驱钻机时,通过接箍、顶驱连接工具和钻井液分流通管汇的配合实现连续循环。接单根时,接箍体上下两个闸板密封钻杆周围,接头位于全封闸板和下部闸板之间,钻井流体在循环压力作用下进入接箍体内,平衡钻柱内外压力。卸扣上提钻杆,关闭全封闸板,上部卸压后将公扣连接部分提出接箍体,此时钻井流体通过接箍下部循环进入钻柱中。连接在顶驱上的新的单根进入接箍体上部,闸板密封钻杆周围,循环系统注入钻井液恢复上部压力。当上下两部分压力平衡时,打开全封闸板,新的单根下放。释放接箍体内压力,打开密封,移开接箍,钻井再次开始,整个过程循环不间断,从而保持井底压力恒定。

### 4 连续循环阀系统控制法

挪威 Statoil 公司发明了连续循环阀系统 CCV,在钻进的井段上每个单根(或立柱)接头上加装特殊三通阀,在接单根时可以通过此阀维持循环,从而实现接单根过程的连续循环<sup>[11,12]</sup>,如图 4 所示。

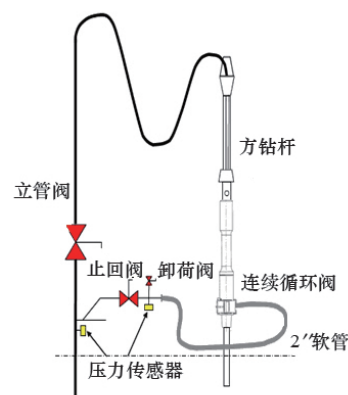


图 4 Statoil 连续循环阀  
Fig. 4 Continuous Circulation Valve of Statoil

CCS 和 CCV 的连续循环系统均依靠井内的钻柱实现连续循环,一旦井内钻柱的循环不可用(如起钻、下钻、或钻具断掉刺堵等)或井内没有钻柱(如测井、完井、停工等待等起出钻柱的场合),则无法维持连续循环。因此,目前依赖于 CCS 或 CCV 的连续循环技术仅解决了钻进和接单根时的连续循环,而对起下钻、测井、完井等过程无法实现连续循环,故 CCS 和 CCV 只能称为接单根时的连续循环系统,只能在接单根和钻进过程中保持井底压力恒定。

### 5 注气稳压技术

由式(1)可知,井底压力在钻进时是环空液柱压力和环空摩阻压力之和,为了保证在接单根过程中保持井底压力恒定,需要用井口回压来替代环空摩阻压力,那么如果在停泵后环空液柱压力增加量等于环空摩阻压力,同样可以达到保持井底压力恒定的目的,注气稳压技术就是通过该原理实现的。

在钻井过程中通过地面注气的方式使钻井液密度减小,从而液柱压力减少以抵消环空循环摩阻的增加。停止循环则环空静液柱压力增加,使井底压力始终维持在所需的稳定值,注气量决定液柱压力减少的程度。这种控制压力钻井方式在塔中油田已经进行了多口井的现场试验<sup>[13-16]</sup>。

### 6 全自动智能控制压力钻井系统

随着井底压力测量、自动节流管汇以及其他自动控制系统的发展,控制压力钻井液向着自动化、集成化方向发展,国内外各大服务公司都在发展自己的智能化控制压力钻井系统,以期获得更为准确、更为迅速的井底压力控制。国内外成熟的系统包括:中国石化的 PCDS-I 精细控压钻井系统、Halliburton DAPC 精细控压钻井系统、Schlumberger 自动节流控压钻井系统、Weatherford Secure Drilling 系统,虽然各个公司名称不同,而且性能指标略有差异,但一般都包括随钻压力测量仪器、井口旋转控制头、回压泵系统、自动节流管汇系统以及自动控制中心几部分,流程示意如图 5 所示。

全自动智能控制压力钻井系统有自动井底压力测量、溢

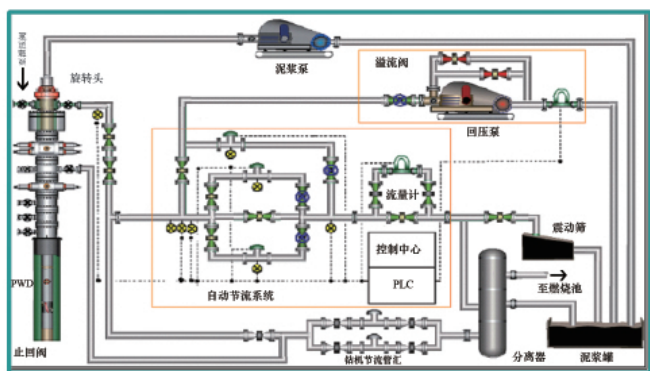


图5 全自动智能控制压力钻井系统示意图

Fig. 5 Fully automatic intelligent managed pressure drilling system

流监测、自动井口压力控制等功能,首先根据流量情况和井底压力自动分析井下压力状况,通过回压泵和自动节流管汇调节井口回压,从而确保井底压力在孔隙压力和破裂压力之间。由于这套自动控制系统有自反馈功能,能够根据各种流量、压力参数的变化自动进行调节,所以更加精确地实现了井底恒压控制压力钻井。就技术水平而言,国外公司的产品在设备先进性、可靠性及自动化程度方面都领先国内较多,这种自动控制压力系统也是以后的发展方向。

## 7 结论

(1) 控制压力钻井技术能有效降低井下复杂情况的发生,减少非生产时间,因此在国内外得到了广泛的应用,其中井底恒压控制压力钻井是主要的应用形式。

(2) 回压泵加节流管汇控制法、连续循环系统控制法、连续循环阀控制法以及注气稳压方式都能够实现钻进和接单根过程中的井底恒压,回压泵加节流管汇控制法的应用更加广泛。

(3) 随着智能节流管汇、井底压力测量工具及地面检测、控制系统的发展,控制压力钻井技术逐渐向自动化、智能化方向发展,国内外已经开发了商业化的智能自动控制压力钻井系统,未来有可能实现无人值守的自动化安全钻井系统。

## 参考文献 (References)

- [1] Helio S, Joe K. Simple managed pressure drilling method brings benefits [J]. World Oil, 2007, 228(3): 12-17.
- [2] Sylt S, Eide S E, Torvund S. Highly advanced multitechnical MPD concept extends achievable HTHP targets in the north sea[C]. SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, January 28-29, 2008.
- [3] Hannega D, Todd R J, Pritchard D M, et al. MPD-Uniquely applicable

to methane hydrate drilling [C]. SPE/IADC Underbalanced Technology Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, October 11-12, 2004.

- [4] Medley G H, Reynolds P B B. Distinct variations of managed pressure drilling exhibit application potential[J]. World Oil, 2006, 227(3): 41-44.
- [5] Medley G H, Moore D, Nauduri S, et al. Simplifying MPD: Lessons learned [C]. SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, January 28-29, 2008.
- [6] Silvang S A, Leuchtenberg C, Gil I C, et al. Managed pressure drilling resolves pressure depletion related problems in the development of the HTHP Kristin Field [C]. SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, January 28-29, 2008.
- [7] Hannegan M. Managed pressure drilling in marine environments—case studies [C]. SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Netherlands, February 23-25, 2005.
- [8] Reitsma D, van Riet E. Utilizing an automated annular pressure control system for managed pressure drilling in mature offshore oilfields [C]. Offshore Europe, Aberdeen, UK, September 6-9, 2005.
- [9] 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): 1-4.  
Zhou Yingcao, Cui Meng, Zha Yongjin. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(4): 1-4.
- [10] 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.  
Wang Guo, Fan Honghai, Liu Gang, et al. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(1): 34-38.
- [11] 向雪琳, 朱丽华, 单素华. 国外控制压力钻进技术[J]. 钻采工艺, 2009, 32(1): 27-30.  
Xiang Xuelin, Zhu Lihua, Shan Suhua. Drilling & Production Technology, 2009, 32(1): 27-30.
- [12] Jenner J W, Elkins H L, Springett F, et al. The continuous circulation system: An advance in constant pressure drilling[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, September 26-29, 2004.
- [13] Vogel R. Continuous circulation system debuts with commercial successes offshore Egypt, Norway[J]. Drilling Contractor, 2006, 62(6): 50-52.
- [14] Torsvolla A, Horsrud P, Reimers N. Continuous circulation during drilling utilizing a drill string integrated valve—the continuous circulation valve[C]. IADC/SPE Drilling Conference, Miami, Florida, USA, February 21-23, 2006.
- [15] 石希天, 肖铁, 雷万能. 塔里木奥陶系碳酸盐岩敏感性储层控压钻井技术应用[J]. 钻采工艺, 2010, 33(6): 130-131.  
Shi Xitian, Xiao Tie, Lei Wanneng. Drilling & Production Technology, 2010, 33(6): 130-131.
- [16] 张利生, 宋周成, 白登相. 注气控压钻井技术在塔里木油田的应用[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2008, 5(3): 168-170.  
Zhang Lisheng, Song Zhoucheng, Bai Dengxiang. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2008, 5(3): 168-170.

(责任编辑 刘志远)