

◀低渗油气田高效开发钻井技术专题▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2012.03.005

## 基于井下流量测量的微流量控制系统

李群生, 朱礼平, 李果, 欧彪

(中国石化西南油气分公司工程技术研究院, 四川德阳 618000)

**摘要:**为了能够快速有效地监测井下复杂情况并控制井底压力, 开发了一种基于微流量测量的控制系统, 根据实时监测钻井液进出口流量的变化来判断井下复杂情况, 通过调节井口节流装置的开度来控制井口回压, 从而实现对井底压力的精确调节和控制。设计了一套井下压差式环空微流量测量装置, 该装置能够快速监测由于早期井涌、井漏等井下复杂情况而引起的井底流量的微小变化, 并将井下测得的数据通过 MWD 传送至地面, 与井口数据相结合进行分析, 从而能够更加有效地提高微流量控制系统对井底复杂情况的判断能力和系统控制精度。介绍了井下微流量控制流程, 进行了压差式井下环空流量测量装置的入井试验, 分析了试验结果。入井试验表明, 该装置可成功监测环空井底微流量变化, 及时反映井底工况, 且测量精度较高。

**关键词:**控压钻井 流量测量 微流量控制 数据传输

**中图分类号:**TE242.9    **文献标识码:**A    **文章编号:**1001-0890(2012)03-0023-05

## Micro-Flow Control System Based on Downhole Flow Measurement

Li Qunsheng, Zhu Liping, Li Guo, Ou Biao

(Engineering Technology Institute of Southwest Petroleum Branch, Sinopec, Deyang, Sichuan, 618000, China)

**Abstract:** In order to monitor down-hole complex conditions and control bottom-hole pressure, a new drilling method based on micro-flow control has been developed in recent years. As a type of MPD, this technique can identify downhole complex conditions and control the backpressure by adjusting the opening of choke. This technique controls the down-hole pressure accurately by monitoring real time change of drilling fluid's flow rate in the surface. A Differential Pressure Meter has been developed based on problems of current MFC methods, which can detect the micro-change of downhole flow induced by early kick, lost circulation and other complicated conditions and the information is transmitted to the surface by MWD. Through the borehole experiments for Differential Pressure Meter of the micro-flow, the micro-change of downhole flow can be measured successfully, downhole conditions can be identified in a timely manner with high accuracy.

**Key words:** managed pressure drilling; flow measuring; micro-flow control; data transmission

目前, 深井、复杂井面临的主要钻井难题是如何在窄钻井液密度窗口中安全钻进, 而控制压力钻井技术能够精确控制环空压力剖面, 从而可以解决该难题。控制压力钻井技术主要包括环空压力控制钻井(MPD)技术与环空微流量控制(MFC)钻井技术<sup>[1]</sup>。MPD 的操作方式主要以随钻井下环空压力测试装置(APWD)所测得的数据为依据, 再结合地面参数(井口回压、进出口流量等)进行环空压力的闭环控制。但是, 当钻井过程中发生气侵时, 由于气体密度很小, 即使气侵量很大, 不会对环空压力剖面

产生很大影响, 以至于当气体上升很长一段距离时, APWD 仍无法检测出环空压力的变化。另外, 钻井

收稿日期:2012-03-01; 改回日期:2012-05-05。

作者简介:李群生(1981—),男,河北辛集人,2004年毕业于西南石油学院石油工程专业,2011年获中国石油大学(北京)油气井工程专业硕士学位,主要从事钻井工程设计及相应管理工作。

联系方式:(0838)2551787,20221115@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项“低渗油气田高效开发钻井技术”课题5“低渗气藏复杂地层高效钻井关键技术”(编号:2008ZX05022-005)部分研究内容。

液本身的多相流特点及其在循环过程中的波动性,使得地面流量计无法准确地测量出口钻井液流量,只有在出口流量由于井内气体膨胀而产生明显变化时或从钻井液池的液面增量才能判断溢流情况,这样就会增加井控的时间和成本,甚至可能导致井控失败,引发井喷或井漏等恶性事故<sup>[2]</sup>。因此,对控制压力钻井系统来说,面临的最大难题是能否准确获取井下复杂工况的参数。压差式井下环空流量测量装置能较好地解决该难题,该装置安装在近钻头处,比现有测量方法能更早发现溢流或井漏,提高钻井安全性。

## 1 井下微流量控制钻井的基本原理

井下微流量控制钻井是一种基于地面 MFC 系统的钻井技术。该技术以井下环空流量为控制对

象,通过实时监测钻井过程中井下环空流量的变化,并把相关数据通过 MWD 及时传输到地面,结合地面其他钻井参数进行分析处理,判断井下发生的各种复杂情况,以合理有效地控制井底压力。井下微流量控制系统主要由井下流量测量及信号传输系统、地面参数测量及数据采集系统、专用地面节流管汇和中央控制系统等部分组成<sup>[3]</sup>。

微流量控制系统与地面 MFC 系统相比,除了需要旋转控制头、专用节流管汇和中央数据采集与控制系统 3 大部件外,增加了井下流量测量装置。正常流量控制过程中的钻井液循环路径依次是钻机泵、立管、温度及压力传感器、质量流量计、井口、钻柱、井下流量监测系统、防喷组、压力控制设备、质量流量计、传感器、电驱液压自动节流管汇、分离器和振动筛,最后到达钻井液罐,如图 1 中红色路线所示。

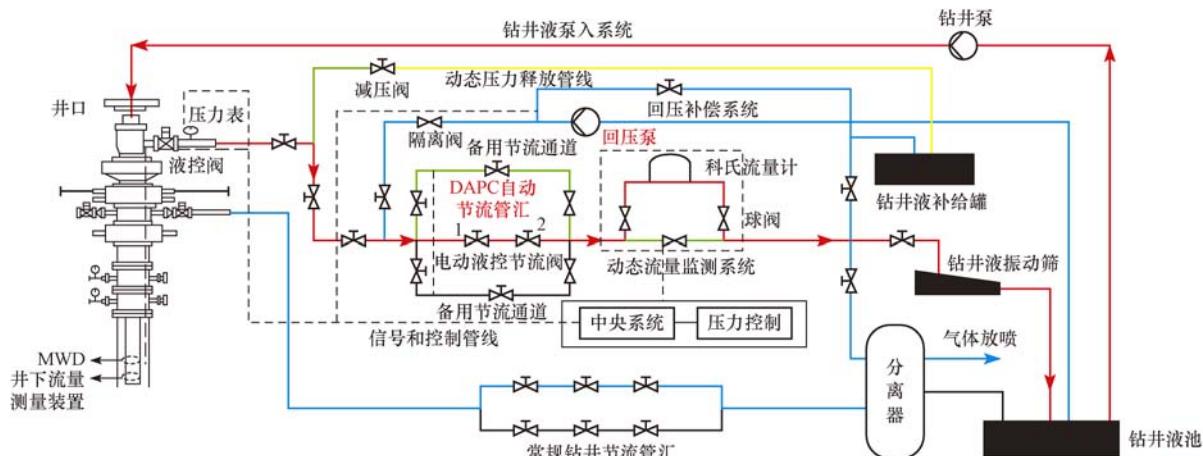


图 1 微流量控制系统组成

Fig. 1 Schematic diagram of micro-flow control system

## 2 压差式井下环空流量测量装置

### 2.1 井下流量监测方法选择

结合川西地区天然气井钻井工况,钻井液密度窗口井段集中在 3 500~4 500 m 井段,要求测量装置耐压 75 MPa,耐温 125 °C,这种条件下对测试方法的要求较为苛刻。由于测量井况(如井眼不规则、压力波动、多相介质混合、钻柱偏心等因素)的限制,超声波和电磁法等测量方法很难适应井下环空流量监测需要,且压差流量测试法受多相流态、地下磁场以及钻井液温度的影响小<sup>[4]</sup>,因此选择工业生产中应用最为广泛的节流压差测试法进行环空流量测量。

### 2.2 压差式环空流量测量的基本原理

流量测量装置采用节流压差法进行井下环空流量测量,其结构如图 2 所示。在近钻头处安装该测量装置(短节),通过约束井壁与环空的介质流动,在节流元件处形成局部收缩,使流速增加、静压力降低,就可以产生一个压差,分别测量节流元件两端的压力,就可得到压差值。该压差值的大小与钻井液环空流速(或流量)之间的关系为:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho g(h_f + h_i) = \rho g \left( \lambda \frac{L}{d} \frac{[v_1(Q)]^2}{2g} + \frac{[v_1(Q)]^2 - [v_2(Q)]^2}{2g} \right) \quad (1)$$

式中: $\Delta p$  为节流短节两端压差, MPa;  $p_1$  为节流短节前端压力, MPa;  $p_2$  为节流短节后端压力, MPa;

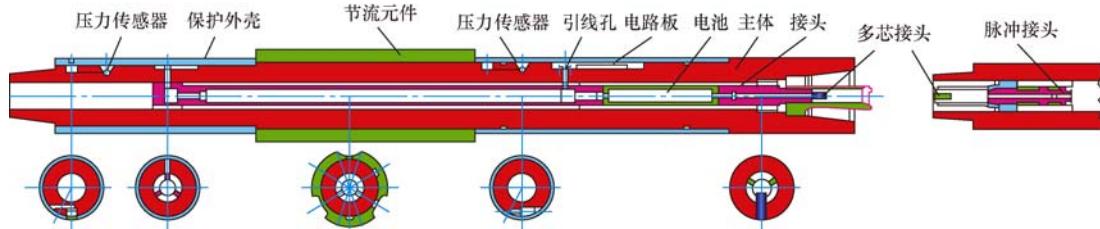


图 2 井下流量测量装置结构

Fig. 2 Structure of downhole flow measurement device

$h_f$  为沿程水头损失, m;  $h_i$  为局部水头损失, m;  $Q$  为环空流量, L;  $v_1(Q)$  为节流元件环空流速( $Q$  函数), L/s;  $v_2(Q)$  为测量装置主体处的环空流速( $Q$  函数), L/s;  $\rho$  为流体密度, kg/L;  $\lambda$  为水力摩阻系数;  $L$  为节流短节长度, m;  $d$  为当量直径, m。

在正常工况下, 环空上返流量趋于稳定, 流体通过节流元件所产生的压差也保持不变; 当发生溢流或井漏等异常情况时, 环空上返流体的流量发生变化, 该变化会反应到节流元件两端压差的变化上, 通过 MWD 传送的数据, 在地面上可以同时检测到压力的变化情况, 根据压力的变化就可以判断井下流量的微小变化, 进而确定溢流或井漏等复杂情况, 并及时采取相应措施进行控制<sup>[4]</sup>。

### 2.3 节流元件设计

节流元件是压差式井下环空流量测量装置最主要的部分, 设计该元件的结构时, 既要考虑到钻井作业的安全性, 又要有足够的压差来满足压力传感器测量精度的要求。笔者的设计思路是以稳定器结构

为基础, 在携岩钻井液能有效通过的前提下, 在有限的长度和截面尺寸条件下设计合适的结构(减小槽的过流面积、采用节流元件串联的多级节流方式), 使之产生所需的压差, 如图 3 所示。

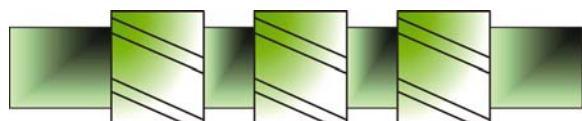


图 3 节流元件结构示意

Fig. 3 Schematic of choke element

节流元件产生的压耗由沿程压力损失和局部压力损失 2 部分组成。考虑井下安全, 单只节流元件不能过长, 这就限制了所产生的沿程压力损失值。为了达到传感器的灵敏度下限, 在有限长度内进一步提高压耗, 需要增加局部压力损失, 而增加节流级数是增加局部压力损失最有效的方式。针对  $\phi 215.9$  mm 井眼五级节流的情况, 使用 Ansys 软件对节流短节进行了压力场分析, 结果与理论计算结果基本吻合(见图 4)。

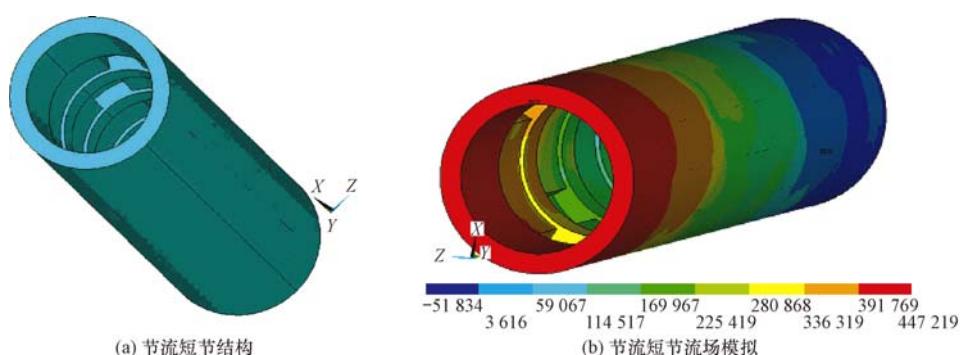


图 4 节流元件压力分布数值模拟

Fig. 4 Pressure distribution on the numerical simulation of choke element

### 2.4 信号采集传输系统设计

为了提高测量工具的可靠性, 数据采集系统采用双电气模式, 该系统分为主系统和备用系统, 是完全相同的 2 套测量系统, 但主系统包含检测转换电路模块(双电气系统结构如图 5 所示)。为了完成压

力、温度工程参数信号的传输, 主系统设计了传感器模块、信号放大模块、数据采集模块、数据处理模块、数据存储模块、数据传输模块、电源模块以及检测转换电路。检测转换电路对系统的数据采集、数据存储、数据传输以及电源电能进行检测, 当检测到异常时, 启动备用系统, 同时关闭主系统。

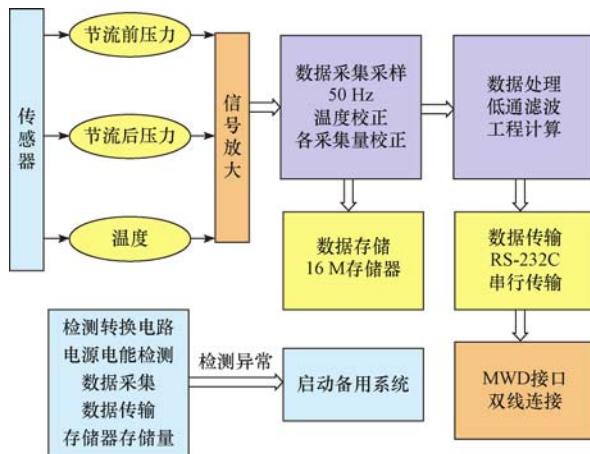


图 5 双电气系统设计框图

Fig. 5 Design block diagram of double electrical system

信号放大模块将毫伏级信号转变为单片机可以接收和处理的信号。数据传输模块采用主从机通讯模式,MWD与测量短节采用双线连接。整个系统的设计立足于使用最少的器件,减小系统体积,在最大限度减少能量消耗的前提下实现系统功能。

实时传输功能是保证仪器具备可操作性的必要条件,为此,设计了一套信号实时传输系统,使微流量测试仪器能够通过MWD把井底测试数据传到地面数据接收终端,快速监测到由于早期井涌、井漏等井下复杂情况引起的井底流量的微小变化,提高微流量控制系统对井底复杂情况的判断能力和系统控制精度。

### 3 井下微流量控制流程

井下环空流量测量系统及地面参数(包括进出口流量、井口回压和井口温度等)测量系统是整个微流量控制系统的核心部分,通过分析实时采集的各种数据,可以及早判断井下复杂情况;专用节流管汇是钻井液循环管道地面主体组成部分,其上面安装有3个电控液动节流阀,1个正常工作,2个备用;中央控制系统则主要负责对所采集的各路信号进行处理及分析,并发出控制信号来调节节流阀开度<sup>[5-7]</sup>。

钻井过程中井下微流量的控制流程见图6。实时监测井下环空流量,并通过MWD把数据输送至地面与环空流量期望值进行比较,不同井段和工况下的环空钻井液流量有不同期望值。当两者存在偏差时,系统进一步判断钻井液是否有漏失。如有漏失,系统可确定破裂压力,并放大自动节流阀门2的开度,减小井口回压;如无漏失或产生溢流,可确定

孔隙压力,并减小自动节流阀门2的开度,适当增大井口回压;当两者一致时,中央控制系统会通过对地面钻井液流量、压力、温度以及钻井液池液面变化等数据与期望值进行比较,来判断井下是否存在其他单靠井下流量测试装置无法发现的复杂情况(如低于测量精度的微小溢流或漏失),若与期望值相符,则表示钻井作业正常,否则就要调整自动节流阀2进行相应控制。这种监测与比较将一直进行下去,实现钻井作业时的钻井液可控循环,实时监测孔隙压力和破裂压力,并根据需要调节节流阀开度来控制井口回压,以满足钻井工艺要求。

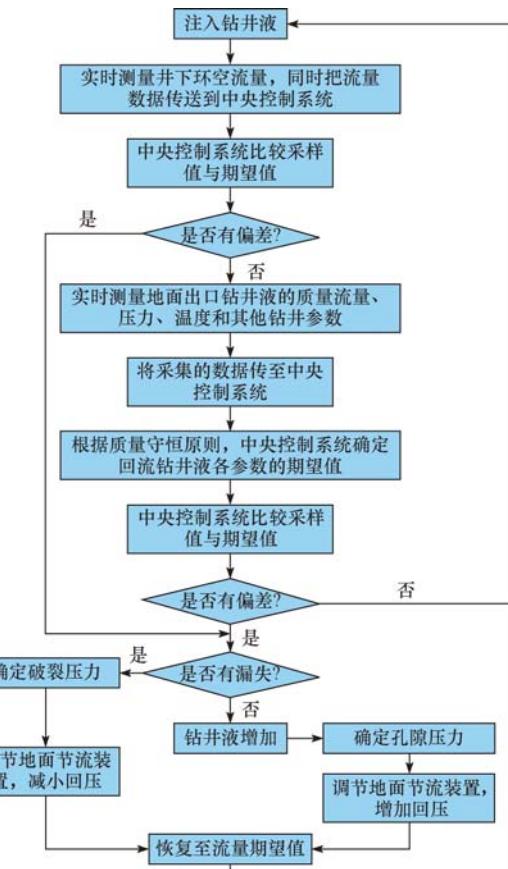


图 6 井下微流量控制系统流程

Fig. 6 Flow chart of micro-flow control system

### 4 入井试验及效果分析

#### 4.1 试验方案

试验井段:SF19井300~1 300 m井段,井眼直径215.9 mm,钻井泵排量20~37 L/s。

试验仪器: $\phi 215.0$  mm节流部件,测量装置总长为1.40 m,MWD工作条件为1.15~1.45 kg/L,数据传输速率为1组/4 min。

试验步骤:1)钻头水眼节流产生压差,使 MWD 系统达到工作条件,监测软件检测压力信号接收情况,确认系统是否正常工作;2)测量装置与 MWD 整体对接入井,改变钻井液排量调整节流压差;3)利用节流短节两端的压力传感器采集数据,连接端口把压力信号传到 MWD,MWD 把压力信号转化为钻井液脉冲信号传到地面,终端解码接收显示。

## 4.2 试验效果

### 4.2.1 地面调试

多次改变钻井液排量,确定立管压力超过 5.5 MPa 时达到了 MWD 工作的钻井液排量要求,信号传输正常,满足通信要求。

### 4.2.2 入井试验及效果

测量装置与 MWD 整体对接入井后,进行了多组试验,试验结果见表 1。

表 1 排量变化、压差值及压差变化率

Table 1 Pressure difference and rate of change along with displacement change

序号	泵冲变化/(冲·min <sup>-1</sup> )	排量变化/(L·s <sup>-1</sup> )	压差变化/MPa	压差变化率/(MPa·L <sup>-1</sup> )
1#	81~85	1.36	0.04	0.029
2#	85~98	4.42	0.16	0.036
3#	98~87	-3.74	-0.08	0.021
4#	87~84	-1.33	-0.21	0.020
5#	84~98	4.76	0.17	0.036
6#	98~79	-6.46	-0.22	0.034
7#	79~87	2.72	0.13	0.048

由表 1 可知:1)在不同钻井液排量变化下,测量短节的实际压差变化率不同;2)考虑试验短节中钻井液堵塞通道等的影响,取 4# 试验数据作为测量基准,测得装置产生 0.02 MPa 以上节流压差对应的排量变化为 1.33 L,解释本次实际测试灵敏度为 1.33 L/s。

## 5 结论与认识

1) 压差式井下环空流量测量装置为控压钻井技术提供了重要支撑。该装置通过压力测量值实时反映井底压力的大小,为微流量控制系统提供可靠的井下数据,并以此判断井底复杂情况。

2) 应用井下环空流量监测装置时,较大的溢流或井漏能够立即被发现并采取措施进行控制,较小

的溢流或井漏则可通过结合地面钻井液参数的实时监测及时发现,从而把总溢流或井漏量控制在很小的范围内。

3) 控制系统结构较为简单,只需在现有各种类型钻机上安装传感器和专用节流管汇,在近钻头处接上微流量测量装置和 MWD,占地面积小,操作简单。在控制系统出现问题时,还可以立即转换为常规钻井方式继续钻进。

4) 在钻井过程中,由于钻头破碎岩层、钻井液冲蚀和岩石物性引起的井眼直径变化会导致测量结果受到一定影响,为排除这一干扰,需要结合地质资料及现场工况对测量数据的影响规律进行详细分析,避免漏判、错判等情况的发生。

5) 压差式环空微流量测量装置作为一种新工具,有其独特的优势与发展潜力,但也不可避免地存在一些问题(如整个调节系统需增加稳定性),有待继续研究和改进。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 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.  
Zeng Lingxiang, Li Qian, Liang Haibo, et al. Comparison between managed pressure drilling(MPD) and micro-flux control (MFC)drilling[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(2):82~84.
- [2] 石磊,陈平,胡泽,等.井下流量测量装置在 MPD 系统中的应用研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2010,32(6):89~92.  
Shi Lei, Chen Ping, Hu Ze, et al. The application of bottom-hole flow meter in the MPD system[J]. Journal of Southwest Petroleum University:Science & Technology Edition, 2010, 32(6):89~92.
- [3] 姜建胜,李奔,林立,等.国外钻井液微流量控制系统的开发与应用[J].石油机械,2008,36(2):71~74.  
Jiang Jiansheng, Li Ben, Lin Li, et al. Foreign drilling fluid micro flow control system and its application[J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(2):71~74.
- [4] 石磊,陈平,胡泽,等.井下微流量控制方法[J].天然气工业,2011,31(2):79~81,84.  
Shi Lei, Chen Ping, Hu Ze, et al. A method of bottom-hole micro-flux control[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(2):79~81,84.
- [5] Santos H, Catak E, Kinder J, et al. First field applications of microflux control show very positive surprises[R]. IADC/SPE 108333, 2007.
- [6] Santos H, Reid P, McCaskill J, et al. Deepwater drilling made more efficient and cost-effective using the microflux control method and an ultralow-invasion fluid to open the mud weight window[J]. SPE Drilling & Completion, 2007, 22(3):189~196.
- [7] Santos H, Catak E, Kinder J, et al. Kick detection and control in oil-based mud:real well test results using micro-flux equipment[R]. SPE/IADC 105454, 2007.