

◀ 钻采机械 ▶

doi:10. 3969/j. issn. 1001-0890. 2012. 05. 023

## 精确监测井底溢流的井下微流量装置设计与试验

屈俊波, 陈 平, 马天寿, 黄万志, 胡 泽

(油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 四川成都 610500)

**摘 要:**为了能够准确判断井下复杂情况,基于节流压差原理,以稳定器结构为基础,研制了一种井下压差式环空微流量测量装置,精确测量从钻杆进入井底和环空返回流体流量的微小变化,并通过 MWD 将井下数据实时传输至地面上,提高了微流量装置对井底复杂情况的判断能力和监测精度,实现了对井底溢流的实时监测。根据建立的微流量测量短节的理论模型,推导出溢流时流量变化与压差的关系式,采用 ANSYS 有限元模拟软件进行了不同工况模拟,并与现场采集的试验数据进行了分析对比。现场试验表明,微流量测量装置运行稳定、无故障,经受住了现场多种工况的考验,实际测量灵敏度达到了 0.5 L/s,对监测井底溢流、特别是气侵具有明显的优势。

**关键词:**溢流 微流量 压差 监测

**中图分类号:**TE28<sup>+</sup>3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2012)05-0106-05

## Design and Test of Down-Hole Micro-Flow Device for Monitoring Overflow

Qu Junbo, Chen Ping, Ma Tianshou, Huang Wanzhi, Hu Ze

(State Key Laboratory of Oil & Gas Geology and Exploration (Southwest Petroleum University), Chengdu, Sichuan, 610500, China)

**Abstract:** In order to monitor down-hole complex conditions, a new micro-flow rate measurement device, based on the structure of stabilizer and choke pressure difference theory, had been developed. It monitors the micro-flow rate changes of drilling fluid from inside drill pipe to annulus space accurately, and transmits the data or information to the surface by MWD, improving the ability of monitoring complicated downhole conditions, and realizing real time monitoring of overflow. This article introduced the theoretical model of micro-flow rate nipple, derived mathematical formulas of flow rate change and pressure difference when oil and gas kicking, used ANSYS to simulate different working conditions, analyzed and compared theoretical calculation result with experimental data collected in the field. The field test showed that the device ran stably for a long time, and endured every kind of trial in different conditions, the actual sensitivity had reached 0.5 L/s, with obvious superiority for monitoring bottomhole kicks, especially for gas kick.

**Key words:** overflow; micro-flow; pressure difference; monitoring

对于深井、超深井,采用常规溢流监测技术监测地面流量变化来反推井底流量的变化,存在监测误差大、信息滞后等问题<sup>[1]</sup>。一方面,由于钻井液的流动具有多相流特性及其流量在循环过程中的波动性,使地面流量计无法准确测量井口钻井液流量,造成反推计算结果与井下真实数据误差很大,不利于准确判断井下工况,只有在出口流量由于井内气体膨胀而产生明显变化时或钻井液池中钻井液体积增量明显时才能判断溢流情况<sup>[2]</sup>;另一方面,地层流体

从井底运移到井口的距离较长,需要一定时间,地面监测到的数据严重滞后,不能实时反映井底流量变

**收稿日期:**2012-05-30;**改回日期:**2012-08-21。

**作者简介:**屈俊波(1984—),男,湖北孝感人,2010年毕业于西安石油大学油气储运工程专业,在读硕士研究生,主要研究方向为油气井测量与过程控制。

**联系方式:**13658025234,qujunbo@139.com。

**基金项目:**国家科技重大专项“低渗气藏微流量测量与环空压力场研究”(编号:2008ZX05002-005-005HZ)部分研究成果。

化<sup>[3]</sup>,大大增加了井控的时间和成本,甚至导致严重井控事故。为此,笔者根据压差式测量原理<sup>[4]</sup>研制了微流测量装置。该微流量测量装置安装在近钻头处,直接在井底对溢流所引起的环空流量的微小变化进行监测,测量灵敏度达到了 0.5 L/s,能够避免反推计算引起的误差。测量装置与 MWD 连接<sup>[5]</sup>,能够将井下数据实时传输至地面上,能够更早发现井下溢流情况,即从地层流体刚进入井筒时就开始采取措施,把井下复杂情况对钻井作业的影响程度降至最低。

## 1 井下微流量测量原理

微流量测量短节的设计思路是以稳定器结构为基础<sup>[6]</sup>,考虑钻井液和岩屑能够有效通过,采用节流压差原理进行井下环空流量测量,其测量原理如图 1 所示。在离钻头一根钻铤(约 9 m)的位置安装微流量测量短节,在一定位置处安装前端(离钻头较近位置)压力传感器 A 和后端压力传感器 B。钻井液循环时,A 与 B 传感器的读数分别为 2 测点位置处的环空压力,二者读数存在一个差值,这个差值就是节流短节节流作用所引起的压差,根据这个压差可推算出环空钻井液实时上返流量的大小;再将钻井液环空上返流量与入口流量进行比较,两者的差值反映了井底流量变化情况。测量短节与 MWD 连接,可以将井下数据实时传输至地面上<sup>[7]</sup>,实现井下溢流的实时监测,便于及时采取相应措施。

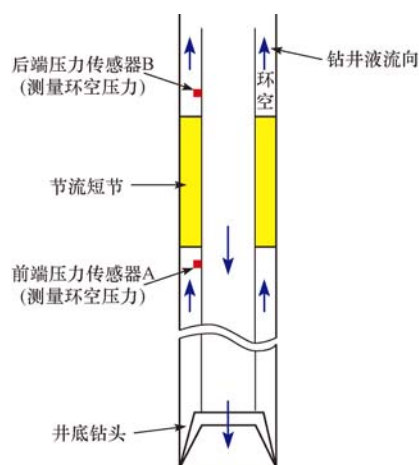


图 1 微流量装置的测量原理

Fig. 1 Measuring principle of micro-flow rate device

根据流体力学原理<sup>[8]</sup>,A 与 B 两传感器的压差与钻井液环空流速(或流量)之间的理论计算关

系为:

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

式中: $\Delta p$  为节流短节两端压差,Pa; $p_A$  和  $p_B$  分别为节流短节前端和后端实测压力,Pa; $L$  为节流短节长度,m; $d$  为节流短节当量直径,m; $Q$  为环空流量,L/s; $v_1(Q)$  和  $v_2(Q)$  分别为节流元件处环空流速和测量装置主体处环空流速,m/s; $\rho$  为钻井液密度,kg/m<sup>3</sup>; $g$  为重力加速度,m/s<sup>2</sup>; $\lambda$  为沿程摩阻损失系数,层流  $\lambda=96/Re$ ,紊流  $\lambda=0.015\sim0.024$ 。

## 2 节流短节模拟分析

为了掌握井下溢流工况下微流量测量装置节流短节压力分布情况<sup>[9]</sup>,分别模拟了油水侵、气侵 2 种溢流工况下的节流短节压力分布情况。

### 2.1 油水侵模拟分析

采用 ANSYS 有限元模拟软件对油水侵工况下的节流短节压力场进行模拟分析,其中边界条件定义为<sup>[10]</sup>:进口定义为速度入口,流量为 30 L/s,出口定义为压力出口,压力为 20.00 MPa,计算模型为  $\kappa-\epsilon$  方程(2eqn),求解方式采用 SIMPLEC 算法。图 2 为测量装置节流短节环空压力场分布模拟结果。图 3 为与测量装置相切平面的压降模拟结果。从图 2 和图 3 可看出,流体流经每一级节流元件的压降约为 0.45 MPa,经过 5 级节流,井眼环空压力从 22.24 MPa 降至 20.00 MPa,即 30 L/s 的流量可以在测量装置两端产生 2.24 MPa 的压降,测量精度满足要求。

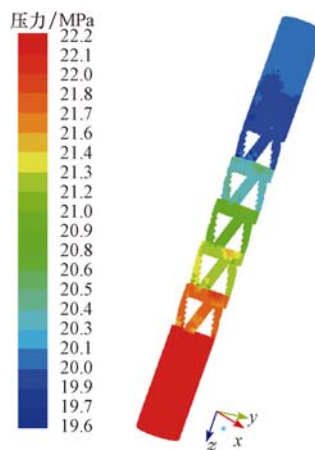


图 2 油水侵节流短节环空压力场分布

Fig. 2 Annular pressure distribution at choke nipple with oil and water kick

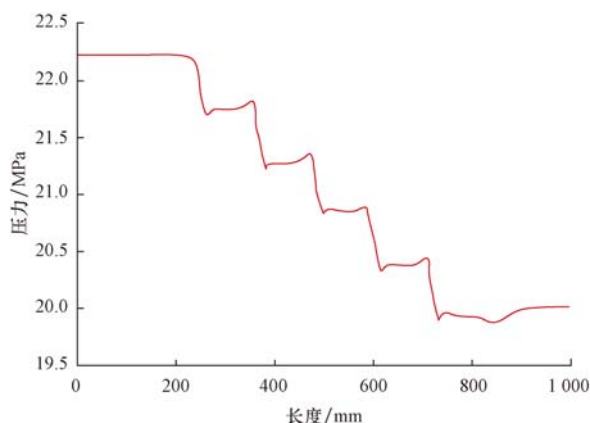


图3 油水侵节流短节压降曲线

Fig. 3 Pressure drop curve at choke nipple with water and gas kick

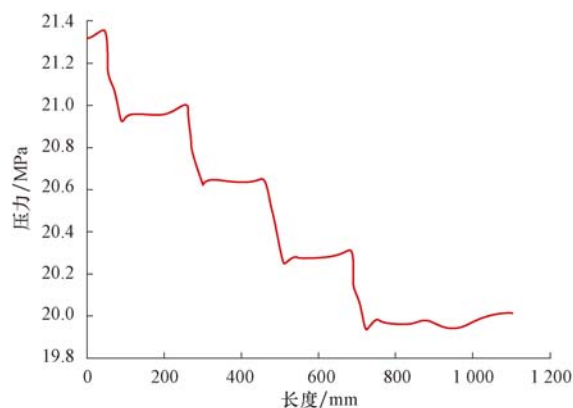


图5 气侵节流短节压降曲线

Fig. 5 Pressure drop at choke nipple with gas kick

## 2.2 气侵模拟分析

采用 ANSYS 有限元模拟软件对气侵工况下的节流短节压力场进行模拟分析<sup>[11]</sup>,其中边界条件定义:进口定义为速度入口,流量为 30 L/s,设定入侵气体为  $\text{CH}_4$ ,气体体积分数为 5%。出口定义为压力出口,压力为 20 MPa,选用多相流模式,计算模型为 VOF 和  $\kappa-\epsilon(2\text{eqn})$ ,求解方式采用 SIMPLEC 算法。图 4 为测量装置节流短节环空压力场分布模拟结果。图 5 为与测量装置相切平面的压降模拟结果。从图 4 和图 5 可看出,流体流经每一级节流元件的压降约为 0.43 MPa,经过 5 级节流,井眼环空压力从 22.16 MPa 降至 20.00 MPa,即流量为 30 L/s 时(其中气体体积分数为 5%),可以在测量装置两端产生 2.16 MPa 的压降,测量精度满足要求。

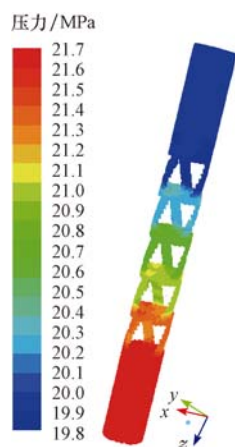


图4 气侵节流短节环空压力场分布

Fig. 4 Annular pressure distribution at choke nipple with gas kick

## 3 现场试验

井下微流量测量装置样机研制完成后,在四川地区进行了现场试验,以验证井下微流量测量装置的强度、稳定性、可靠性和设计的合理性。

### 3.1 试验概况

试验井是西南某气田的一口水平井,试验井段为二开直井段,井深 1 221~1 910 m。套管程序:  $\phi 244.5 \text{ mm} \times 334 \text{ m} + \phi 139.7 \text{ mm} \times 2 997 \text{ m}$ ,试验井段井径 215.9 mm。试验井段钻遇地层自上而下为蓬莱镇组 2 段、蓬莱镇组 1 段和遂宁组。试验井段泵压 9.2~15.2 MPa,排量 27.40~36.12 L/s,钻井液密度 1.12~1.50 kg/L,转速 98~108 r/min。

试验钻具组合:  $\phi 215.9 \text{ mm}$  钻头 + 减振器 +  $\phi 177.8 \text{ mm}$  无磁钻铤  $\times 1$  根 + 回压阀 + 微流量测量短节 +  $\phi 177.8 \text{ mm}$  钻铤  $\times 5$  根 +  $\phi 158.8 \text{ mm}$  钻铤  $\times 9$  根 + 旁通阀 +  $\phi 127.0 \text{ mm}$  加重钻杆  $\times 12$  根 +  $\phi 127.0 \text{ mm}$  钻杆。

在生产井开展试验无法模拟井下真实溢流这类高风险工况<sup>[12]</sup>,在现场试验中通过改变钻井液入口排量来改变井下流量变化,即通过调节钻井泵泵冲模拟井下排量改变。调节钻井液入口排量的试验要求及过程如下:1)在单泵条件下排量从小到大,然后在双泵条件下排量大小反复交替(相当于发生了多次人工溢流或失返,以增强试验效果),再在单泵条件下从大到小改变排量,观察并记录各种排量下的立压;2)每组排量下在流动稳定后(改变排量 15 min 后)再读取立压;3)记录每次调节钻井液排量的时间节点。

3.2 试验数据分析

图 6 为试验期间井下微流量测量装置的实测数据曲线。后端压力传感器 B 不受节流压差变化的影响,只与环空静液柱压力、井口回压与环空摩阻等因素有关,在这些因素没有发生变化时,压力基本保持一致<sup>[13]</sup>,故后端压力即红色曲线保持平稳。前端压力传感器 A 所测数据为真实的井底压力,节流短节由于受到泥饼的粘附以及试验时排量不断改变的影响,节流压差存在一定的波动,而井底压力又受节流压差变化的影响,因此前端压力即蓝色曲线存在一定的波动,其波动正好反映了节流压差的变化,与现场试验工况完全吻合。

根据实测数据对比分析了试验时不同排量下的理论计算压差和实测压差(见表 1),由表 1 可知,实测压差与理论压差误差总体上都比较接近,二者的误差总体约为 10%,实测数据的平均压差变化率为 0.048 MPa·s/L。由于井下微流量测量装置的测量分辨率为 0.002 MPa,则井下微流量测量装置测量分辨率为 0.417 L/s,因此井下微流量测量装置的测量精度为 0.5 L/s。同时,由实测压差与理论压差绘制压差与排量的变化规律曲线如图 7 所示,从图 7 可以看出,实测压差与理论压差曲线非常接近<sup>[14]</sup>,能够满足现场井下微流量测量及井下压力测量的需求。

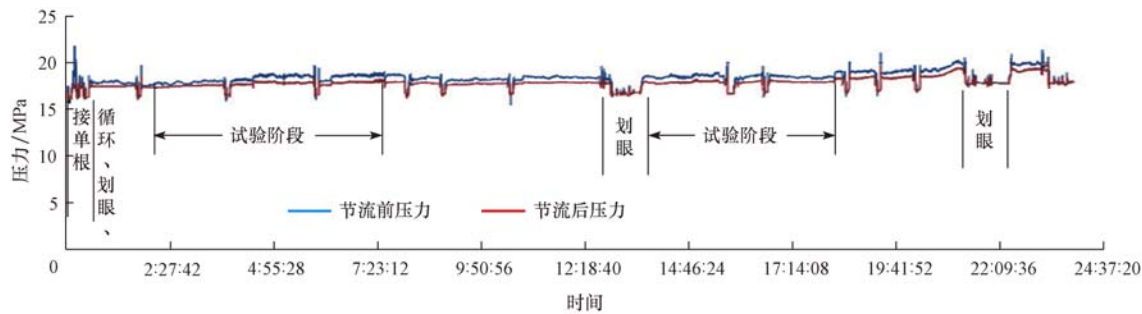


图 6 试验阶段井下微流量测量装置实测压力曲线

Fig. 6 Actual pressure curve with downhole micro-flow rate device during testing

表 1 试验阶段不同排量下压差对比数据

Table 1 Comparison of differential pressure at different flow rate during testing

序 号	泵冲/min <sup>-1</sup>	排量/ (L·s <sup>-1</sup> )	立压/MPa	理论压差/ MPa	实测压差/ MPa	排量变化/ (L·s <sup>-1</sup> )	压差变化/ MPa	压差变化率/ (MPa·s·L <sup>-1</sup> )
1	88	27.40	10.00	0.382	0.336			
2	92	28.64	11.10	0.418	0.332	1.24	-0.004	0.003
3	96	29.89	11.80	0.455	0.431	1.25	0.099	0.079
4	100	31.13	14.10	0.494	0.482	1.24	0.051	0.041
5	116	36.10	16.20	0.664	0.681	4.97	0.199	0.040
6	112	34.87	15.20	0.619	0.731	-1.23	0.050	0.041
7	104	32.38	14.10	0.534	0.597	-2.49	-0.134	0.054
8	116	36.12	14.00	0.664	0.709	3.74	0.112	0.030
9	108	33.62	13.20	0.576	0.698	-2.50	-0.011	0.004
10	116	36.12	13.50	0.664	0.624	2.50	-0.074	0.030
11	104	32.38	13.10	0.534	0.564	-3.74	-0.060	0.016
12	116	36.11	14.50	0.664	0.653	3.73	0.089	0.024
13	100	31.13	11.50	0.494	0.569	-4.98	-0.084	0.017
14	96	29.89	12.10	0.455	0.534	-1.24	-0.035	0.028
15	92	28.64	11.20	0.418	0.501	-1.25	-0.033	0.026
16	88	27.42	9.90	0.382	0.450	-1.22	-0.051	0.042



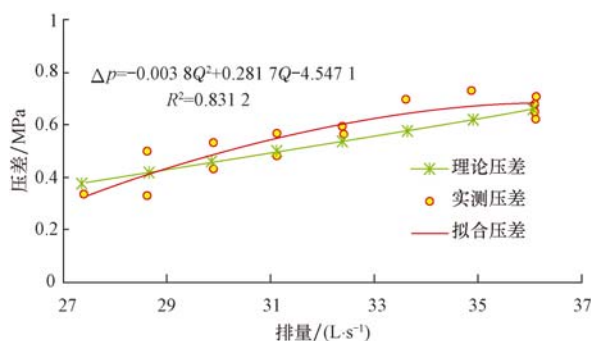


图7 试验阶段理论压差与实际压差比较

Fig.7 Comparison of theoretical differential pressure and actual differential pressure during testing

## 4 结 论

1) 井下微流量测量装置能够监测井下环空流量的微小变化,并通过MWD实时传输井下数据,提高了流量控制的准确性和实时性,克服了常规溢流监测技术的诸多不足。该装置不仅能够用于控制压力钻井,而且能够用于常规钻井,为安全优质快速钻井提供可靠的技术支持。

2) 井下微流量测量装置的测量精度为0.5L/s,能够及时发现井下溢流,为控制压力钻井提供了更加及时的井下监测数据和更加先进的技术手段。该装置还兼备随钻环空压力测量(APWD)功能,不需要单独的APWD测量工具,具有显著的优势。

3) 以流体力学基本原理为基础,开展了微流量压差法测试数学模型和有限元模型研究,提出了针对井下溢流流体通过节流元件所产生压差的理论计算方法,推导出流量变化与压差的计算表达式,并利用ANSYS有限元模拟软件进行模拟和分析,验证了计算结果的正确性。

4) 井下微流量监测技术有其独特的优势和发展潜力,但目前国外对其研究不够深入,国内尚处于初步研究阶段,存在装置设计尺寸以及在井下安装位置的优化和井径变化、转速、钻柱振动的影响等问题,这些都有待进一步研究。

## 参 考 文 献

### References

[1] 李兴杰,何成山,马红,等.随钻测量井底压力、温度和钻井液密度的方法探讨[J].录井工程,2008,19(4):38-41.  
Li Xingjie, He Chengshan, Ma Hong, et al. Method of bottom hole pressure, temperature and drilling fluid density measurement while drilling[J]. Mud Logging Engineering, 2008, 19

(4):38-41.  
[2] 李群生,朱礼平,李果,等.基于井下流量测量的微流量控制系统[J].石油钻探技术,2012,40(3):23-27.  
Li Qunsheng, Zhu Liping, Li Guo, et al. Micro-flow control system based on downhole flow measurement[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(3):23-27.  
[3] 史玉胜,何世明,林文秀,等.微流量控压钻井技术研究现状[J].钻采工艺,2011,34(3):12-14.  
Shi Yusheng, He Shiming, Lin Wenxiu, et al. Research on micro-flux control pressure drilling technology[J]. Drilling & Production Technology, 2011, 34(3):12-14.  
[4] Salant Richard F. The use of modeling to understand malfunction and failure in mechanical seals[J]. Sealing Technology, 2003, 203(12):22-28.  
[5] 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.  
[6] 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.  
[7] Santos H, Catak E, Kinder J, et al. First field applications of microflux control show very positive surprises[R]. IADC/SPE 108333, 2007.  
[8] 胡志坤,柳贡慧,李军,等.利用微流量控制系统实现控制压力管理钻井技术[J].特种油气藏,2009,16(2):81-84.  
Hu Zhikun, Liu Gonghui, Li Jun, et al. Pressure management drilling by using micro-flow control system[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2009, 16(2):81-84.  
[9] 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.  
[10] 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.  
[11] Angelo Calderoni, Giorgio Giorla, Helio Santos, et al. Microflux control and E-CD continuous-circulation valves allow operator to reach HP/HT reservoirs for the first time[R]. SPE 122270, 2009.  
[12] Yu X Q, He S, Cai R L. Frictional characteristics of mechanical seals with a laser-textured seal face[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1/2/3):463-466.  
[13] Anonymous. GD: a new generation of gas lubricated mechanical seals for vessels in the chemical industry[J]. World Pumps, 2001, 2001(421):40-42.  
[14] 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.