文章编号:1673-5005(2010)02-0125-05

钻井液提升阀流量系数的测定

朱万胜,张作龙,李继志

(中国石油大学 机电工程学院,山东 东营 257061)

摘要:以钻井液作为介质,对锥阀、球阀、板阀3种阀芯4种不同结构的阀座形式在不同开度下的流量、压力进行测量和计算,得出了各种条件下钻井液提升阀阀口流量系数及其规律,并与水压阀阀口流量系数进行对比分析。结果表明:阀座倒角角度和倒角长度对锥阀及球阀阀口流量系数有较大影响,对板阀影响较小;背压存在与否对板阀流量系数变化规律影响较大;与水压阀相比,钻井液提升阀阀口流量系数略高。

关键词:钻井液;幂律流体;提升阀;流量系数

中图分类号:TE 927 **文献标志码**:A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2010.02.025

Measurement of flow coefficient of poppet valve for drilling fluid

ZHU Wan-sheng, ZHANG Zuo-long, LI Ji-zhi

(*College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Dongying* 257061, *China*)

Abstract: Experimental investigations were made on the flow coefficient of cone valve, ball valve and plate valve taking drilling fluid as the working media. The data and law of flow coefficient of poppet valve for drilling fluid were obtained in various situations by measuring flow and pressure at different opening of four structures of valve seats. The flow coefficient was compared with that of water valve. Results show that the angle and length of seat's chamfer have a significant effect on flow coefficient of cone valve and ball valve, and relatively slight influence on plate valve. The back pressure has an obvious influence on plate valve's flow coefficient. The flow coefficient of poppet valve for drilling fluid is larger than that of water valve.

Key words: drilling fluid; power-law fluid; poppet valve; flow coefficient

目前,在导向钻井、随钻测量等油气田开发系统中,广泛采用液压阀对钻井液进行控制[1-3]。液压阀口一般采用锥阀、球阀、板阀等座阀形式。由于与水或液压油的性质不同,因此在对以钻井液作为介质的阀类元件进行设计计算时,一些重要的柔性参数如流量系数不能按照水压或者油压传动的理论或实验数据进行选择。国内外的研究者针对以矿物油或纯水为介质的液压提升阀阀口处的流量系数以及压力流量特性进行了大量的理论及实验研究[4-8]。但是,与矿物油及水相比,钻井液具有不同的理化性能,而国内外在这方面的研究较少。笔者对钻井液锥阀、球阀、板阀3种阀芯在不同结构阀座形式下的流量系数及流动特性进行实验研究,从而找出不同条件下钻井液提升阀阀口流量系数变化规律及其影响因素。

1 实验原理及装置

无论是锥阀、球阀、板阀或其他阀口形式,通过阀口的流量都可统一表示为

$$q = C_d A(x) \sqrt{2\Delta p/\rho}. \tag{1}$$

式中,q 为通过阀口的液体流量,m^3/s;$A(x)$ 为阀口过流面积,m^2;Δp 为阀口两端压差,Pa;ρ 为流体密度,kg/m^3;C_d 为流量系数。

因此,通过测量不同形式阀口的流量和阀口前后的压差以及阀口开度,可以得到不同条件下各阀口的流量系数。

图1为实验中所采用的模型阀体。阀进出口压力由系统调定,并分别由压力传感器进行测量。通过阀口的流量用流量计测定,利用调节手柄改变阀

收稿日期:2009-10-23

基金项目:国家"863"计划项目(2008AA09Z311)

作者简介:朱万胜(1977-),男(汉族),山东曹县人,博士研究生,研究方向为石油机械及流体工程设备设计。

万方数据

口开度,通过更换阀芯和阀座,可对不同结构参数的阀口流量系数进行计算。

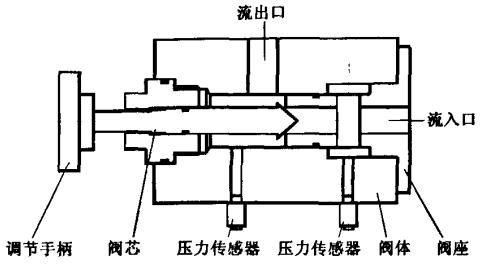


图 1 实验阀装配体示意图

Fig. 1 Schematic diagram of assembly of experimental valve

实验中所采用的阀芯结构有锥阀(半锥角 45°)、球阀和板阀 3 种。阀座结构分为 4 种,其结构形式及尺寸见表 1。

表 1 实验阀座结构参数

Table 1 Structure parameters of experimental valve seats

试件	阀座半锥角 α/(°)	倒角长度 L/mm	入口直径 d/mm
A	30	2.89	13
B	45	3.54	11
C	60	4	11
D	45	6.36	8

所采用介质为胜利油田某井场现场应用钻井液,具体参数如下:密度 $\rho=1\,200$ kg/m^3,表观黏度 $\mu_{AV}=24$ MPa·s,塑性黏度 $\mu_{PV}=15$ MPa·s,静剪切力 $\tau=9$ Pa。

幂律流体雷诺数计算公式为

$$Re=\frac{vD\rho}{\mu_e}\cdot\frac{4n}{3n+1},\tag{2}$$

其中

$$\mu_e=\frac{\tau}{\dot{\gamma}}=K\left(\frac{8v}{D}\cdot\frac{3n+1}{4n}\right)^{n-1}.\tag{3}$$

式中,Re 为雷诺数;v 为钻井液流速,m/s;D 为阀口直径,m;μ_e 为等效黏度,Pa·s;ρ 为钻井液密度,kg/m^3;K 为稠度系数,Pa·s^n;n 为幂指数。

经计算可得,实验中所采用钻井液稠度系数 $K=1.61$ Pa·s^n,幂指数 $n=0.49$。

2 实验结果分析

2.1 锥阀流量系数

图 2 为阀芯为锥阀,试件 A,B,C,D 在不同开度,阀出口无背压条件下的流量与雷诺数曲线。由图 2 可以看出:

(1)存在一个临界雷诺数 Re_c,不同开度、不同结构尺寸下,其临界雷诺数不同,通过大量实验数据可得:$Re_c=3\,500\sim4\,500$。当 $Re\leqslant Re_c$ 时,流量系数随雷诺数增加而增加,且增加趋势明显;当 $Re>Re_c$ 时,随雷诺数增加,流量系数趋于稳定。

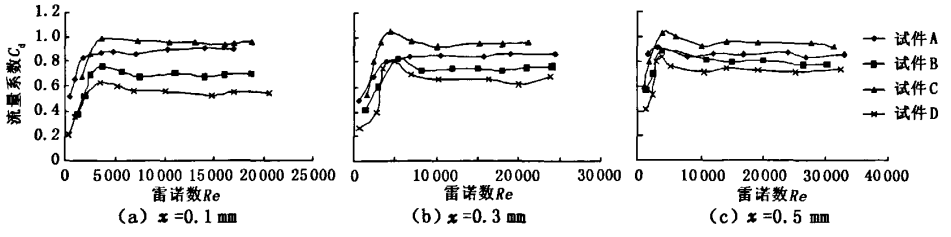


图 2 不同阀口开度、无背压时锥阀的流量系数与雷诺数的关系曲线

Fig. 2 Relation of flow coefficient of cone valve and Reynolds number without back pressure at different valve port aperture

(2)在任意开度下,试件 B 和试件 D 的流量系数都略小于其他两试件,而且与试件 B 相比,试件 D 的流量系数更小。这是由于试件 B 和试件 D 的倒角角度与阀芯半锥角角度相同,阀芯与阀座间为面接触,当阀芯开度较小时,与阀座之间间隙较小,倒角处充满高速钻井液,液流的射流收缩截面位于阀口下游,阀口处压力恢复不够,使得流量系数减小,并且随着阀座倒角长度的增加,该处压力恢复越小,甚至无压力恢复作用,从而使得流量系数更小。

(3)试件 A 阀口处倒角角度较小,阀座与阀芯接触形式类似于锐缘阀座。在小开度下($x\leqslant0.3$ mm),随着雷诺数的增加,流量系数增大并趋于稳定。但随着阀口开度的增加,流量系数有减小的趋势。阀口开度为 0.1 mm 时,阀口处流量系数为 0.90~0.95;阀口开度为 0.3 mm 时,流量系数为 0.80~0.86。当阀口开度较大时($x\geqslant0.5$ mm),阀口流量系数基本不随雷诺数变化而变化,其值为 0.78~0.91。

(4)试件 C 在所有开度下流量系数都较高,并且较稳定,在高雷诺数下,流量系数稳定在 0.86~

万方数据

0.96。这是由于试件 C 的阀座倒角角度大于阀芯半锥角角度,阀芯与阀座接触线位于阀芯锥角前端,高速钻井液通过阀口后易于附壁,压力恢复较快所致。

2.2 球阀流量系数

图 3 为球阀芯在 4 种试件,出口无背压条件下的雷诺数——流量系数曲线图。由图 3 可知:

(1)当阀芯为球阀时,在所有开度下,试件 B 和试件 D 的流量系数都要略高于其他两种试件,这与阀芯为锥阀时的情况相反。这是由于试件 A 与球阀芯的接触线位于阀座倒角大径处,其接触方式类似于锐缘阀座,钻井液通过阀口后,不易附壁;而试件 C 与球阀芯的接触线虽然位于倒角小径处,但是其倒角角度为 60°,大于试件 B 和试件 D 的角度,所以压力恢复效果低于上述两个试件。倒角长度越大,流体越容易附壁,压力恢复越快,从而导致流量系数增加。因此,几乎在所有开度条件下,试件 B 和试件 D 的流量系数都较高,且试件 D 的流量系数大于试件 B 的值。

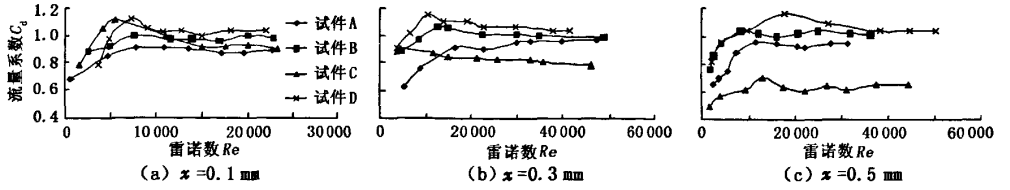


图 3 不同阀口开度、无背压时球阀的流量系数与雷诺数的关系曲线

Fig. 3 Relation of flow coefficient and Reynolds number of ball valve without back pressure at different valve port aperture

(2)在开度一定的条件下,试件 A 的流量系数随雷诺数的增大而增大,最终达到一个较稳定的数值。在所有开度下,流量系数相差不大,为 0.90 ~ 0.98。

(3)试件 C 在所有开度下的流量系数都比较小,并且随着阀口开度增大,在相同的雷诺数下,流量系数逐渐减小。阀口开度 $x = 0.1$ mm 时,流量系数最大,为 0.90 ~ 1;$x = 0.3$ mm 时,流量系数为 0.78 ~ 0.85;$x = 0.5$ mm 时,流量系数最小,为 0.65 ~ 0.70。通过分析可知,阀口开度较小时,钻井液流体黏附于阀座之上,压力恢复较大,使流量系数较大。随着开度的增加,流体不再附壁,压力恢复作用逐渐减弱,从而使流量系数减小。另外,在开度一定的情况下,随着雷诺数的增加,流量系数下降并趋于稳定,这是由于高速钻井液通过阀口后的射流收缩作用使得流体附壁现象逐渐减弱甚至消失,同时由于流速的增大,液流收缩截面也逐渐向阀口下游移动,压力恢复不够所致。

2.3 板阀流量系数

阀芯为板阀时,各试件在不同开度下的流量系数变化规律相似。图 4 为阀口开度 $x = 0.3$ mm 时板阀的流量系数与 Re 的关系曲线。由图 4(a)可以看出,在阀出口无背压的情况下:

(1)当雷诺数 Re 为 2 500 ~ 3 000 时,流量系数达到最大值,为 0.85 ~ 1.1,此值与板阀直径和阀口孔径之比有关,流量系数 $C_{qmax} \approx 1.15 - 0.065e^{D/(2d)}$。

(2)在 $Re \leqslant 4\,000$ 时,随雷诺数增加,流量系数先增大后减小,C_d 与 Re 接近二次关系,即 $C_{dmax} = -k(Re - Re_m)^2 + C_{dmax}$,其中 Re_m 是 C_{dmax} 所对应的雷诺数,$k \approx 10^{-8} \sim 10^{-7}$。

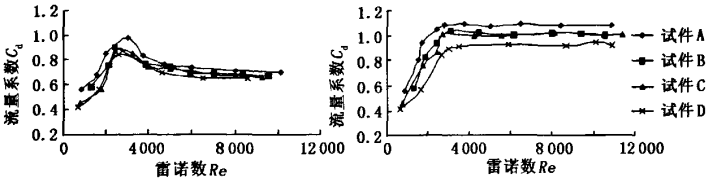
(3)当 $Re > 4\,000$ 时,随着雷诺数的增加,板阀阀口流量系数逐渐减小并趋于稳定,最终位于 0.65 ~ 0.75。在所有开度下,试件 A 流量系数最大,而试件 D 流量系数最小,由此可以看出,阀座孔径对于板阀流量系数影响较大,孔径越大,流量系数越大。

与出口无背压的情况不同,当板阀出口存在背压时,阀口处的流量系数不再随雷诺数的增加而减小(图 4(b)),板阀流量系数的最终稳定值高于无背压时的数值。这是由于阀口下游增加背压后,提高了阀出口处的静压值,避免了负压的存在,使得气穴现象不易发生,从而保证了流量系数具有较高的稳定值。另外,在不同开度下,背压是否存在对于流量系数的影响不同。当阀口开度较大时,阀口下游无背压与有背压两种情况下的流量系数相差不大,说明阀口开度越大,流量系数受到气穴现象的影响越小。

通过实验可以看出,在阀出口处增加背压有利于抑制气穴现象的出现,提高阀口的抗气蚀能力,因

万方数据

此为了增大阀口的流量系数,在阀出口加一定的背压是有必要的。



(a)无背压 (b)有背压

图 4 阀口开度 $x=0.3$ mm,有、无背压时板阀的流量系数曲线

Fig. 4 Flow coefficient curve of plate valve when x is 0.3 mm with and without back pressure

2.4 不同介质流量系数对比

为了比较钻井液与纯水在阀口处流量系数的区别,以水为介质,对阀芯为锥阀,不同类型阀座下的流量系数进行实验研究。图 5 为钻井液与水两种介质在试件 A,阀口开度 $x=0.5$ mm 条件下的雷诺数与流量系数的关系曲线。由图 5 可以看出,钻井液在锥阀阀口处的流量系数略高于水的流量系数,介质为水时,流量系数为 0.75 ~ 0.85,介质为钻井液时,流量系数为 0.78 ~ 0.91。随着雷诺数增加,二者之间的差距逐渐减小,这一现象同样也出现在阀芯为锥阀的其他试件中。这是由于钻井液的黏度略高于水的黏度,通过阀口后,由于液体的黏滞性使得射流收缩减小,同时由于钻井液中固相颗粒的影响,使液流流动过程中,流束方向较之纯水不易改变,因此钻井液的收缩系数高于介质为水时的数值,从而导致流量系数略高。

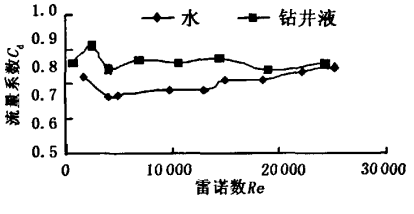


图 5 两种介质、阀口开度 $x=0.5$ mm、无背压时锥阀的流量系数曲线

Fig. 5 Flow coefficient curve of cone valve when x is 0.5 mm without back pressure using two different media

另外,由于钻井液具有剪切变稀的特性,流体运动速度越高,其黏度越小,与水的黏度值之间的差别越小。因此在高雷诺数时,钻井液与水通过阀口时的流量系数相差不大。

3 结 论

(1)阀座倒角的角度和长度对于钻井液锥阀的流量系数有较大影响,阀座倒角与阀芯半锥角相同时,阀口处流量系数值较小,倒角长度越长,流量系数越小。阀座倒角略大于阀芯半锥角时,阀口处流量系数较大。

(2)当球阀阀芯与阀座倒角接触线位于倒角中部时,流量系数最大,且倒角长度越长,流量系数越高,但稳定性较差。

(3)板阀流量系数受倒角影响较小,但受阀口孔径影响较大,孔径越大,板阀流量系数越大。另外,背压的存在与否对板阀流量系数有一定影响,背压的存在有利于抑制气穴的产生,提高流量系数。

(4)钻井液在阀口处的流量系数略高于介质为水时的数值,随着雷诺数的增加,二者之间的差值减小。

参考文献:

[1] 苏义脑,李松林,葛云华,等. 自动垂直钻井工具的设计及自动控制方法[J]. 石油学报,2001,22(4):87-91.
SU Yi-nao, LI Song-lin, GE Yun-hua, et al. The design and control ways of the downhole automatic closed loop of vertical drilling tool [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001,22(4):87-91.

[2] 房军,苏义脑. 随钻测量阀控式液压信号发生器动态数学模型[J]. 石油机械,2004,32(6):26-28.
FANG Jun, SU Yi-nao. Dynamic mathematical model for valve controlled MWD hydraulic signal generator [J]. China Petroleum Machinery,2004,32(6):26-28.

[3] 苏义脑. 井下控制学研究进展[M]. 北京:石油工业出版社,2001:99-122.

[4] JOHNSTON D N, EDGE K A, VAUGHAN N D. Experimental investigation of flow and force characteristics of hydraulic poppet and disc valves [J]. Proc Inst Mech Engrs,1991,205:161-171.

[5] LIU Yin-shui, NIE Song-lin, ZHU Yu-quan. Experimental study of effects of operating conditions on the flow characteristics of water hydraulic throttle [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 17(3):450-453.

[6] ZHU Bi-hai, ZHANG Tie-hua, HUANG Yan. Experi-

万方数据

mental investigations of cavitation effects on flow characteristics of small orifices and valves in water hydraulics [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 15(4):380-384.

[7] 高红,傅新,杨华勇,等. 锥阀阀口气穴流场的数值模拟和实验研究[J]. 机械工程学报,2002,38(8):27-30.
GAO Hong, FU Xin, YANG Hua-yong, et al. Numerical and experimental investigation of cavitating flow within hydraulic poppet valve [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(8):27-30.

[8] 朱碧海,刘银水,李壮云,等. 水压节流阀口流量特性的实验研究及水压节流阀的研制[J]. 机床与液压,2004,5:63-65.
ZHU Bi-hai, LIU Yin-shui, LI Zhuang-yun, et al. Experimental investigation of the flow characteristics of throttle valves in water hydraulics and development of a new-type water hydraulic throttle valve [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2004, 5:63-65.

[9] 贺小峰,黄国勤,杨友胜,等. 球阀阀口流量特性的试验研究[J]. 机械工程学报,2004,40(8):30-33.
HE Xiao-feng, HUANG Guo-qin, YANG You-sheng, et al. Experimental research on the flow characteristics of ball valve orifice [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(8):30-33.

[10] VAUGHAN N D, JOHNSTON D N, EDGE K A. Numerical simulation of fluid flow in poppet valves [J]. Proc Instn Mech Engrs, Part C, 1992, 206:119-127.

[11] HISANORI UENO, ATSRSHI OKAJIMA, HIROYOSHI TANAKA. Noise measurement and numerical simulation of oil flow in pressure control valves [J]. JSME International Journal, Series B, 1994, 37(2):336-341.

[12] KAZUMI ITO, KOJI TAKAHASHI, KIYOSHI INOUE. Flow in a poppet valve [J]. JSME International Journal, Series B, 1993, 36(1):42-50.

[13] GAO Hong, FU Xin, YANG Hua-yong. Numerical investigation of cavitating flow behind the cone of a poppet valve in water hydraulic system [J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE, 2002, 3(4):395-400.

(编辑　沈玉英)

(上接第 124 页)

[5] FREDSOE J, HANSEN E A. Lift forces on pipelines in steady flow [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1987, 113(2):139-155.

[6] LAM K Y, WANG Q X, ZONG Z. A nonlinear fluid-structure interaction analysis of a near-bed submarine pipeline in a current [J]. Journal of Fluids and Structures, 2002, 16(8):177-1191.

[7] BURESTI G, LANCIOTTI A. Mean and fluctuating forces on a circular cylinder in cross-flow near a plane surface [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41-44(1-3):639-650.

[8] BEARMAN P W, ZDRAVKOVICH M M. Flow around a circular cylinder near a plane boundary [J]. Journal of Fluids and Structures, 1978, 89(1):33-47.

[9] HANSEN E A, FREDSOE J, MAO Y. Two-dimensional scour below pipelines: proceedings of the 5th International Symposium Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1986 [C]. Japan: Tokyo, c1986.

[10] 李亚智,赵美英,万小鹏. 有限元法基础与程序设计[M]. 北京:科学出版社,2004.

[11] 刘鸿文. 材料力学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,2003.

(编辑　沈玉英)

万方数据