文章编号:1673-5005(2006)02-0036-05

钻井中双级流量分配的理论研究

彭 烨[1], 沈忠厚[1], 侯庆勇[2], 王福修[2]

(1.中国石油大学 石油工程学院,山东 东营 257061;2.胜利石油管理局 钻井工艺研究院,山东 东营 257017)

摘要:双级分流系统由导眼体喷嘴组、扩眼体喷嘴组、级间钻柱中心孔和级间环空组成,为一个并联流道系统。推导出了双级流量分配公式,确立了双级流量分配的基本原则,并应用公式对导眼体分流流量进行了参数变化影响规律分析,在其他参数不变的条件下推导出了描述喷嘴组的当量直径和级间段长与导眼体分流流量间的简化关系式。结果表明,导眼体和扩眼体喷嘴组的当量直径对导眼体分流流量影响较大,是调整双级分流的主控因素;级间段长对其影响较小,在喷嘴组设计时给予适当考虑,在两级之间加钻柱时,导眼体的清洗是能保证的;钻铤内径、钻井液表观粘度、喷嘴流量系数对其影响很小,钻井液密度、井眼扩大系数、钻铤外径的影响则更小。

关键词:双级结构; 流量分配; 影响规律; 理论研究

中图分类号:TE 21 **文献标识码**:A

Theory study on two-stage flow distribution in drilling

PENG Ye[1], SHEN Zhong-hou[1], HOU Qing-yong[2], WANG Fu-xiu[2]

(1. *College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying* 257061, *Shandong Province, China*; 2. *Drilling Technology Research Institute of Shengli Petroleum Administration Bureau, Dongying* 257017, *Shandong Province, China*)

Abstract: Two-stage flow distribution system is made up of nozzle assembly in pilot and in enlarger, center hole of stem and annulus between two stages, which is a parallel connection flow way system. The universal formulas on flow distribution of two stages were derived, and the basic principle of flow distribution of two stages was established. The effects of various parameters on distributary flux of the pilot were analyzed. And the simple formulas for stating the relationship between the equivalent diameters of nozzle assembly and section length and distributary flux of the pilot were derived under the condition of other parameters fixed. The results show that the equivalent diameters of nozzle assembly in pilot and in enlarger have much effect on distributary flux of the pilot that is an available means to adjust distributary flux. The section length has less effect, so that adding a section of stem between two stages, the clean of pilot can be ensured when the nozzle assembly is designed. The inner diameter of drill collar, drilling fluid viscosity and nozzle's flux factor have less effect, and the drilling fluid density, hole enlarged factor and outer diameter of drill collar have much less effect.

Key words: two-stage structure; flow distribution; influence law; theory study

随着钻井技术的发展,出现了多种需要双级分流的破岩工具,如双级钻头、双心钻头、扩眼器等。这些工具中一类工具(如双级钻头和双心钻头)由导眼体和扩眼体组成,在作业中两体都需要钻井液清洗、冷却和润滑[1-6];另一类工具(如扩眼器)只有扩眼体,在已有导眼中扩眼时需要连接一段管柱(即导眼体)引导扩眼器沿原井眼方向扩眼,一方面需要钻井液冲击清除沉砂、使导眼畅通,另一方面扩眼体也需要钻井液清洗、冷却和润滑。因此需要设计这些工具的钻井液双级分流系统,以满足两级工况要求。目前,对破岩工具的水力学研究主要集中在全面钻井钻头方面,未见有对双级流量分配研究的相关文献[7]。这类工具的设计和使用也主要靠经验,很容易因双级分流不合理造成泥包现象,以致破岩效率降低。另外,在较浅和较软的地层中,优化设计分流系统还可充分发挥机械-水力联合破岩作用,大大提

收稿日期:2005-10-16

作者简介:彭烨(1969-),男(汉族),四川营山人,高级工程师,博士研究生,从事PDC钻头及井下工具研制工作。

万方数据

高破岩效率。为充分利用水力和发挥这类破岩工具的作用,提高其破岩效率,需要从理论上研究双级分流的原理,了解双级分流的规律,从而指导此类破岩工具的设计和使用。

1　双级分流原理

双级分流系统由导眼体喷嘴组、扩眼体喷嘴组、级间钻柱中心流道和级间环空组成,如图 1 所示。两喷嘴组之间的间距(简称级间段长)为 L。钻井液总流量为 Q,扩眼体分流流量为 Q_k,导眼体分流流量为 Q_d。总流量为 Q 的钻井液通过钻柱中心流道流入,流经扩眼体时分流,流量为 Q_k 的钻井液经过扩眼体喷嘴组流入扩眼体外环空;流量为 Q_d 的钻井液继续经级间钻柱中心流道流经导眼体喷嘴组流入导眼体外环空,经级间环空流到扩眼体与从扩眼体喷嘴组流出的钻井液汇合,形成合流,合流总流量为 Q。

从上述分析可以看出,双级分流系统为两路并联流道系统,一路为从扩眼体经扩眼体喷嘴组进入扩眼体外环空,另一路从扩眼体经级间钻柱中心流道、导眼体喷嘴组和级间环空进入扩眼体外环空。

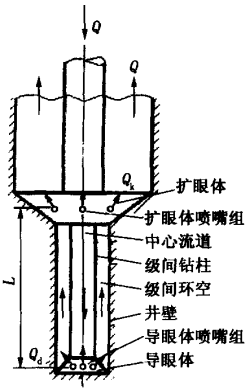

图 1　双级分流系统示意图

2　双级流量分配公式推导

2.1　并联管路水力特点

根据并联管路水力特点,并联管路的总流量等于各并联管的流量之和[8],即

$$Q = Q_k + Q_d. \tag{1}$$

各并联管的能量损失都相同[8],即各并联管的压降相同,

$$|p_2 - p_1| = \Delta p_k = \Delta p_i + \Delta p_d + \Delta p_o. \tag{2}$$

式中,p_1 为扩眼体内孔压力,MPa;p_2 为扩眼体外环空压力,MPa;Δp_k 为扩眼体喷嘴组压力降,MPa;Δp_i 为级间钻柱内孔压力降,MPa;Δp_d 为导眼体喷嘴组压力降,MPa;Δp_o 为级间环空压力降,MPa。

2.2　喷嘴组压力降

喷嘴组压力降是指钻井液流过喷嘴组以后钻井液压力降低的值。当钻井液排量和喷嘴组当量尺寸一定时,根据流体力学的能量方程,可以得到喷嘴组压力降公式[9,10],其表达式为

$$\Delta p_k = \frac{0.5\rho Q_k^2}{C_k^2 A_{0k}^2} = K_k Q_k^2, \tag{3}$$

$$\Delta p_d = \frac{0.5\rho Q_d^2}{C_d^2 A_{0d}^2} = K_d Q_d^2. \tag{4}$$

其中

$$K_k = \frac{0.5\rho}{C_k^2 A_{0k}^2},\ K_d = \frac{0.5\rho}{C_d^2 A_{0d}^2},$$

$$A_{0k} = \pi d_{ek}^2/4,\ d_{ek} = \sqrt{\sum_i^n d_i^2},$$

$$A_{0d} = \pi d_{ed}^2/4,\ d_{ed} = \sqrt{\sum_j^m d_j^2}.$$

式中,ρ 为钻井液密度,kg/m^3;C_k,C_d 分别为扩眼体和导眼体喷嘴组的流量系数,无因次;A_{0k},A_{0d}分别为扩眼体和导眼体喷嘴组的当量出口面积,m^2;K_k,K_d 分别为扩眼体和导眼体喷嘴组的压降系数;d_{ek},d_{ed}分别为扩眼体和导眼体喷嘴组的当量喷嘴直径,m;d_i,d_j 分别为扩眼体和导眼体喷嘴组的喷嘴直径,m;n,m 分别为扩眼体和导眼体喷嘴组的喷嘴数量。

2.3　级间钻柱压力降

在钻井条件下,钻井液在钻柱内的流动总是紊流,环空流动则可能是层流也可能是紊流,但其压力降的主要组成部分是管内压力降,而环空压力降在数值上较小,在工程上,内外压力降全按紊流流态计算,可以保证足够的精度。钻井液是一种非牛顿流体,根据其流变性不同可分为宾汉流体、幂律流体和卡森流体等流型,在紊流流态下,钻井液流动的剪切速率较高,高剪切速率条件下不同流型钻井液的流变性比较接近。在工程上,将钻井液看作宾汉流体,可以达到足够的计算精度。因此假设:①钻井液为宾汉流体;②钻井液在循环系统各部分的流动均为等温紊流流动;③钻柱处于与井眼同心的位置;④不考虑钻柱旋转;⑤井眼为已知直径的圆形井眼;⑥钻井液为不可压缩流体。

级间钻柱可能用钻杆也可能用钻铤。在以上假设条件下,利用水力学的基本方程推导出钻柱内流动和环空流动压力降计算的基本公式,代入简化的

万方数据

摩阻系数经验公式,得到内外压力降计算公式[9,10]为

钻杆:

$$\Delta p_i+\Delta p_o=\left[\frac{B}{d_{pi}^{4.8}}+\frac{9\,113\,611.324\,61}{(d_h-d_p)^3(d_h+d_p)^{1.8}}\right]\times\rho^{0.8}\mu_{pv}^{0.2}LQ_d^{1.8},$$

钻铤:

$$\Delta p_i+\Delta p_o=\left[\frac{8\,186\,765.785\,66}{d_{ci}^{4.8}}+\frac{9\,113\,611.324\,61}{(d_h-d_c)^3(d_h+d_c)^{1.8}}\right]\times\rho^{0.8}\mu_{pv}^{0.2}LQ_d^{1.8}.$$

式中,B 为常数,内平钻杆 $B=8\,186\,765.785\,66$,贯眼钻杆 $B=9\,113\,611.324\,61$;d_{pi},d_p 分别为钻杆的内径和外径,m;d_{ci},d_c 分别为钻铤的内径和外径,m;d_h 为导眼直径,m;μ_{pv}为钻井液塑性粘度,Pa·s。

令级间压力降系数为 K_L,即

$$\Delta p_i+\Delta p_o=K_LQ_d^{1.8}. \tag{5}$$

联立式(2)~(5)得

$$K_kQ_k^2=K_dQ_d^2+K_LQ_d^{1.8}. \tag{6}$$

式(1)和式(6)联立就是双级流量分配公式,通过该方程组可以计算双级中各级分配的流量,根据流量分配原则来设计各级的喷嘴及其组合,研究各参数对流量分配的影响规律。

如果双级结构为整体结构,级间段长很短,级间压力降可以忽略不计,即 $K_L\approx0$,则式(6)简化为

$$K_kQ_k^2=K_dQ_d^2. \tag{7}$$

将压降系数表达式代入式(7),且假设两喷嘴组的流量系数相等,即 $C_d=C_k$,则有

$$Q_k/Q_d=A_{0k}/A_{0d}.$$

即

$$Q_k/Q_d=d_{ek}^2/d_{ed}^2=\sum_i^n d_i^2/\sum_j^m d_j^2. \tag{8}$$

式(7)和式(8)与式(1)联立就是整体式双级结构流量分配公式,也就是常用的整体式双级结构喷嘴组设计公式。

3 双级流量分配的原则和方法

对所有的破岩工具,其最低排量要求是保证工具充分清洗和冷却,不发生泥包和温度过高现象。对双级结构的排量和流量分配要求也不例外,这是总体原则。

对双级结构来说,扩眼体可以得到导眼体回流的清洗和冷却。通常,如果水力结构设计合理,不会出现泥包现象。在扩眼体布置喷嘴的主要目的是更彻底地清洗扩眼体,减少重复破碎,在软地层中利用水力破岩作用,从而达到提高机械钻速的目的。在导眼体布置足够数量和尺寸的喷嘴,以获得足够的分流,使导眼体得到充分的清洗和冷却,这是双级分流的关键。

综上所述,双级流量分配的基本原则是:在确保导眼体得到足够流量的条件下,适当分配给扩眼体流量,充分利用水力能量提高机械钻速,这也是总排量确定的原则。

4 双级流量分配的参数分析

为更好地研究双级流量分配规律,了解各参数变化对流量分配的影响,更好地指导双级水力结构的设计和现场水力参数的确定,对双级流量分配进行参数分析。因为双级流量分配的基本原则是确保导眼体得到足够流量,因此这里仅研究各参数对导眼体分流流量的影响规律。

双级流量分配公式复杂,不能直接推导出导眼体分流流量的表达式,难以用手工计算的方法进行研究。为此,编写了双级流量分配计算程序,利用循环迭代方法进行计算。

为研究各参数对导眼体分流流量的影响规律,以 Φ241.3 mm×Φ311.15 mm 双级钻头为例,根据目前施工现场实际情况,确定如下基本参数:总排量为 0.05 m^3/s,导眼体直径为 0.241 3 m,扩眼体直径为 0.311 15 m,眼扩大系数为5%,钻井液密度为 1 200 kg/m^3,表观粘度为 4.7 mPa·s,导眼体喷嘴组的当量直径为 0.037 m,扩眼体喷嘴组的当量直径为 0.02 m,两级喷嘴流量系数均为 0.98,钻铤直径为 0.177 8 m,钻铤内径为 0.057 2 m,级间段长 18 m。在研究某参数变化时,其余参数均保持基本条件值不变。利用程序进行数值计算并绘制各参数与导眼体分流流量的关系曲线。

4.1 扩眼体喷嘴组的当量直径对导眼体分流流量的影响

根据双级流量分配原则,Φ241.3 mm 导眼体的分流流量必须满足该尺寸钻头的最低要求排量 0.025 m^3/s,因此取扩眼体喷嘴组的当量直径 d_{ek}为 0.01~0.032 m,经分析得到扩眼体喷嘴组的当量直径对导眼体分流流量的影响关系曲线,如图 2 所示。在其他参数一定的条件下,随着扩眼体喷嘴组当量直径的增大,导眼体分流流量近似呈线性降低,且降低幅度较大,故扩眼体喷嘴组当量直径是设计和现场使用中调整双级分流的有效途径之一。

令 $K_{kd}=\frac{8\rho}{\pi^2C_k^2}$,则 $K_k=K_{kd}/d_{ek}^4$,对式(6)进行

万方数据

整理得

$$Q_d=\frac{Q}{1+d_{ek}^2\sqrt{\frac{K_d+K_LQ_d^{-0.2}}{K_{kd}}}}. \tag{9}$$

式(9)中只有 d_{ek}和 Q_d 是变化的,而当 Q_d 在 0.025～0.05 m^3/s 取值时,$Q_d^{-0.2}$ 的值为 1.82～2.09,计算时看成常数,取 1.955。

令 $K_{ek}=\sqrt{\frac{K_d+K_LQ_d^{-0.2}}{K_{kd}}}$,则

$$Q_d=Q/(1+K_{ek}d_{ek}^2). \tag{10}$$

在上述基本参数条件下,$K_{ek}\approx0.097\,917$。式(10)即为扩眼体喷嘴组当量直径与导眼体分流流量的简化关系式,可用于手工计算。

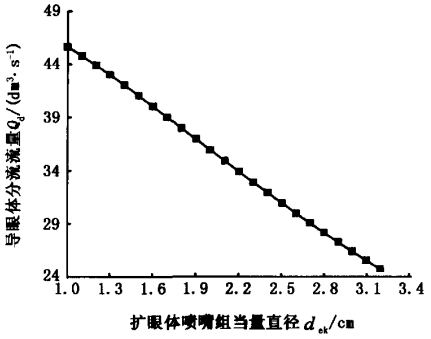

图 2　扩眼体喷嘴组当量直径对导眼体分流流量的影响

4.2　导眼体喷嘴组的当量直径对导眼体分流流量的影响

与扩眼体喷嘴组类似,导眼体喷嘴组的当量直径 d_{ed}在 0.021～0.043 m 内变化,经分析得到导眼体喷嘴组的当量直径对导眼体分流流量的影响关系曲线,如图 3 所示。

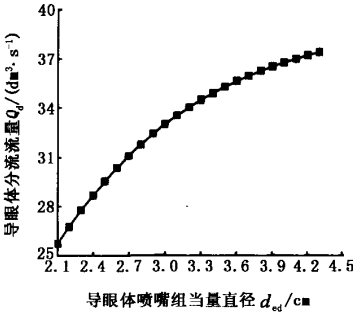

图 3　导眼体喷嘴组的当量直径对导眼体分流流量的影响

在其他参数一定的条件下,随着导眼体喷嘴组当量直径的增大,导眼体分流流量增大,但曲线逐渐趋于平缓,即当量直径的影响逐渐变小。总起来导眼体当量直径的影响比较明显,因此它也是设计和现场使用中调整双级分流的有效途径之一。

为进一步分析影响关系,令 $K_{dd}=\frac{8\rho}{\pi^2C_d^2}$,则 $K_d=K_{dd}/d_{ed}^4$,对式(6)进行整理得

$$Q_d=\frac{Q\sqrt{K_k}}{\sqrt{K_k}+\sqrt{K_{dd}/d_{ed}^4+K_LQ_d^{-0.2}}}.$$

在上述基本参数条件下,$\sqrt{K_k}=0.079\,561$,$K_{dd}=0.101\,28$,$K_LQ_d^{-0.2}\approx0.000\,416\,5$。

4.3　级间段长对导眼体分流流量的影响

在现场,级间段长 L 不可能取得太长,主要考虑井底钻具组合的防斜效果等,因此段长在 0～39 m 内变化,经分析得到级间段长对导眼体分流流量的影响关系曲线,如图 4 所示。随着级间段长的增大,导眼体分流流量减小,但其影响的量值较小,因此如果两级喷嘴组设计时给予适当考虑,在两级之间加钻铤时,导眼体的清洗是能保证的。

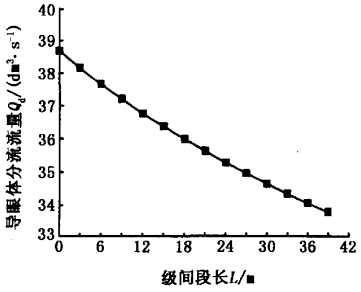

图 4　级间段长对导眼体分流流量的影响

为进一步探讨影响规律,令钻杆:

$$K_{LL}=\left[\frac{B}{d_{pi}^{4.8}}+\frac{9\,113\,611.324\,61}{(d_h-d_p)^3(d_h+d_p)^{1.8}}\right]\rho^{0.8}\mu_{pv}^{0.2},$$

钻铤:

$$K_{LL}=\left[\frac{8\,186\,765.785\,66}{d_{ci}^{4.8}}+\frac{9\,113\,611.324\,61}{(d_h-d_c)^3(d_h+d_c)^{1.8}}\right]\times\rho^{0.8}\mu_{pv}^{0.2},$$

则有 $K_L=K_{LL}L$,对式(6)进行整理得

$$Q_d=\frac{Q\sqrt{K_k}}{\sqrt{K_k}+\sqrt{K_d+K_{LL}LQ_d^{-0.2}}}.$$

在上述基本参数条件下,$K_d=0.000\,54$,$K_{LL}Q_d^{-0.2}\approx0.000\,023\,65$。

4.4　其他参数对导眼体分流流量的影响

根据现场和目前钻井技术的实际,确定各参数的取值变化范围,利用程序就其他参数对导眼体分流流量的影响进行计算分析。计算结果表明,它们

万方数据

的影响在量值上都比较小,在此不做更深入探讨,以下仅就各参数的计算取值范围、对导眼体分流流量的影响趋势和量值予以说明。

(1)井眼扩大系数从 0 增大到 0.1(即导眼直径 d_h 从 0.241 3 m 增大到 0.265 43 m),导眼体分流流量 Q_d 从 0.035 953 m^3/s 增大到 0.035 986 m^3/s,增大量为 0.000 033 m^3/s,影响微小。

(2)钻铤外径 d_c 从 0.158 8 m 增大到 0.203 2 m,导眼体分流流量 Q_d 从 0.035 988 m^3/s 降低到 0.035 917 m^3/s,降低量为 0.000 071 m^3/s,影响微小。

(3)钻铤内径 d_{ci}从 0.057 2 m 增大到 0.071 4 m,导眼体分流流量 Q_d 从 0.035 975 m^3/s 增大到 0.037 603 m^3/s,增大量为 0.001 628 m^3/s,影响较小。

(4)钻井液密度 ρ 从 1 000 kg/m^3 增大到 2 000 kg/m^3,导眼体分流流量 Q_d 从 0.035 893 m^3/s 增大到 0.036 196 m^3/s,增大量为 0.000 303 m^3/s,影响很小。

(5)钻井液表观粘度 μ_{pv}从 0.001 Pa·s 增大到 0.1 Pa·s,导眼体分流流量 Q_d 从 0.036 559 m^3/s 降低到 0.034 305 m^3/s,降低量为 0.002 254 m^3/s,影响较小。

(6)喷嘴流量系数 C_k 和 C_d 从 0.8 增大到 1,导眼体分流流量 Q_d 从 0.036 766 m^3/s 降低到 0.035 883 m^3/s,降低量为 0.001 177 7 m^3/s,影响较小。

5 结 论

(1)扩眼体喷嘴组当量直径增大,导眼体分流流量近似呈线性降低,且影响较明显,故它是设计和现场使用中调整双级分流的有效途径之一。在其他参数不变的条件下,其简化关系式可用于描述它们之间的影响关系和手工计算。

(2)导眼体喷嘴组的当量直径增大,导眼体分流流量也增大,其曲线逐渐趋于平缓,但影响绝对量较大。

(3)随着级间段长的增大,导眼体分流流量减小,但其影响量(小于 0.005 m^3/s)较小,如果两级喷嘴组设计时给予适当考虑,在两级之间加钻铤时,导眼体的清洗是能保证的。

(4)井眼扩大系数、钻铤外径、钻井液密度对导眼体分流流量影响微小,流量变化小于 0.000 5 m^3/s;钻铤内径、钻井液表观粘度、喷嘴流量系数对其影响很小,流量变化小于 0.002 5 m^3/s。

(5)双级流量分配的基本原则是:在确保导眼体得到足够流量的条件下,适当分配给扩眼体流量,以充分利用水力能量提高机械钻速。

参考文献:

[1] DAVE Glowka. Optimization of bit hydraulic configurations[R]. SPE 10240, 1981.

[2] CHEATHAM J B Jr. A study of factors influencing the drillability of shales: single cutter experiments with stratapax drill blanks[J]. Journal of Energy Resources Technology, 1979,101:189-195.

[3] HOLSTER J L, KIPP R J. Effect of bit hydraulic horsepower on the drilling rate of a polycrystalline diamond bit [R]. SPE 11949,1983.

[4] FEENSTRA R, ZIJSLING D H. The effect of bit hydraulics on bit performance in relation to the rock destruction mechanism at depth[R]. SPE 13205,1984.

[5] KNOWLTON R H, HUANG Hsin. Polycrystalline diamond compact bit hydraulics[R]. SPE 11063,1982.

[6] KING I, BRATU C, DEBAST B, et al. Hydraulic optimization of PDC bits[R]. SPE 20928,1990.

[7] 管志川,陈庭根,刘希圣. PDC 钻头水力结构研究进展[J]. 石油大学学报:自然科学版,1994,18(6):136-141. GUAN Zhi-chuan, CHEN Ting-gen, LIU Xi-sheng. The study progression of PDC bit's hydraulic structure [J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science),1994,18(6):136-141.

[8] 袁恩熙,许震芳,王汝元,等. 工程流体力学[M]. 北京:石油工业出版社,1983:141-142.

[9] 陈庭根,管志川,刘希圣. 钻井工程理论与技术[M]. 东营:石油大学出版社,2000:146-154.

[10] 刘希圣. 钻井工艺原理(中册)钻井技术[M]. 北京:石油工业出版社,1992:1-41.

(编辑 李志芬)

万方数据