

钻井循环压耗计算修正系数方法及应用

龙芝辉 汪志明 郭晓乐

(中国石油大学·北京)

龙芝辉等. 钻井循环压耗计算修正系数方法及应用. 天然气工业, 2005; 25(7): 66~68

摘要 通过对实际钻井循环系统分析, 认为在钻井循环过程中把全循环过程看成紊流是有理论依据的、可行的和符合实际的。并结合工程实际, 对常见的紊流压耗计算公式作分析, 找出应用目前的压耗计算公式计算出现误差较大的原因。为了使压耗计算模式准确、实用、能适用于各种井况, 把流体力学研究中的实验方法思想引入钻井循环压耗计算的数学模式, 提出了压耗计算的动态数学模式。在模式中引入可实时测取的四个修正系数, 以便对压耗计算模式作实时修正, 同时给出了修正系数的现场获取方法, 使压耗计算模式可应用于各种井况。此方法在东湾1井应用表明, 具有较高的准确度。

关键词 钻井 循环压耗 计算模式 修正系数 实测方法

一、关于钻井循环的流态

正确判别循环系统的流态是准确计算循环系统压耗的前提。人们最早用 Re 数法判别钻井循环系统的流态, 后来又提出 Z 值法。近年来的室内实验表明, 在轴向流动和钻柱旋转两方面的因素综合作用下, 流动从层流流态到紊流流态的转变, 是在远远低于临界雷诺数或临界泰劳数下发生的, 于是又提出了 Re 数与 Ta 数综合判别流态的方法。

在雷诺实验中还注意到, 判别管流流态的临界雷诺数并不是固定的, 流动从层流向紊流的过度, 除与 Re 数有关外, 还与流动中存在的扰动有关。扰动小, 则扰动易被流体的粘性所削弱, 流动易处于层流; 扰动大, 则不易被流体的粘性所削弱, 反而促使流动更快的进入紊流状态。而在钻进过程中, 钻柱内水眼及环空流道都很小, 由于钻柱的弯曲, 旋转, 周向振动及纵向振动, 使钻柱内及环空的流体在流动过程中伴有钻柱运动引起的强烈的扰动, 足以使钻井循环中的流动更快地呈现紊流状态。

二、压耗计算模式及修正

由管路压耗计算的基本理论, 计算紊流压耗的基本公式是“范宁—达西”公式。

$$\text{对管内流动: } p_i = \frac{2f\rho Lv^2}{d} \quad (1)$$

$$\text{对环空流动: } p_a = \frac{2f\rho Lv^2}{(D_h - D)} \quad (2)$$

式中: f 为实验所得系数, 由于 f 取值的不同, 可得到不同形式的压耗计算公式。常见的计算式有:

$$(1) \text{ 牛顿流型: 取 } f = \frac{A}{Re^{0.2}} \text{ 代入“范宁—达西”}$$

公式可推得:

$$p_i = \frac{2A_i}{\left(\frac{\pi}{4}\right)^{1.8}} \cdot \frac{\mu^{0.2} \rho^{0.8} Q^{1.8} L}{d^{1.8}} \quad (3)$$

$$p_a = \frac{2A_a}{\left(\frac{\pi}{4}\right)^{1.8}} \cdot \frac{\mu^{0.2} \rho^{0.8} Q^{1.8} L}{(D_h + D)^{1.8} (D_h - D)^3} \quad (4)$$

式中: A 为实验常数, 对钻井中常用的内平钻杆可取 $A = A_i = 0.053$, 环空计算可取 $A = A_a = 0.059$ 。

(2) 其它计算式: ①由 Blasius 提出的 f 近似式 $f = \frac{0.0791}{Re^{0.25}}$, 可由上述类似的方法推出相似的计算式, 只是式中各量的指数和前面的系数略有不同。

②宾汉流体的压耗计算公式与上同, 只是用 $\mu = \eta/3.2$ 代入即可, η 为宾汉流体的塑性粘度。

③幂律流型, 可用经验公式 $f = \frac{a}{Re^b}$, a, b 为实验常数, 是流性

指数 n 的函数, 同样可推得一套压耗计算的数学模式。人们在努力地通过试验修正实验常数 a, b , 还是未能得到符合实际好的, 比较通用的压耗计算数学模式。据研究^[2], 在紊流流态下, 不管何种流型的钻

作者简介: 龙芝辉, 1963年生, 副教授, 博士研究生; 长期从事油气井工程专业的教学及科研工作。地址: (102249) 北京市昌平区石油大学(北京)230信箱。电话: (010)89733986。E-mail: longzh897@163.com

井液都表现为牛顿型的规律,所有流型钻井液在紊流下均可使用牛顿型的计算模式。

上述计算模式表明了钻井循环压耗的影响因素如下:①井眼和钻具的几何尺寸 D_h 、 D 、 d 、 L ;②管路中的液流速度(流量 Q);③钻井液的性能参数 μ 、 η 、 n 、 K 、 ρ ;④试验系数 A_i 、 A_a 、 a 、 b 。

1)由于 μ 、 η 、 n 、 K 、 ρ 等钻井液性能是在地面取样测得的,实际井内温度与压力环境随井深变化,特别是温度对钻井液性能参数影响较大,且与钻井液组分有关,没有统一的规律性。环空钻井液还要携带岩屑,这会使环空钻井液密度有所增加。总之,井内的钻井液性能是不稳定的。

2)在裸眼段钻进中,井径 D_h 并不严格地是钻头直径,往往存在井径扩大现象,具体扩大多少在钻进过程中是未知的,井眼扩大对压耗计算影响不小。

3)公式中的试验系统均由研究者通过试验给出,以供使用者查用或固定在公式中,对正在钻进的井段并不是合适的取值。

4)钻进过程中的钻柱旋转、偏心,岩屑床的存在、井斜因素、井温因素、钻具中装用扶正器等,每次钻进遇到的影响钻井循环压耗计算的因素多样而复杂,用一套不变的压耗计算模式很难通用于各种井况下的压耗计算。为了使压耗计算模式准确、实用、能通用于各种井况,有必要把流体力学研究中的实验方法思想引入钻井循环压耗计算的数学模式。令 $B = \mu^{0.2} \rho^{0.8}$ 为钻井液特征系数;引入系数 Z_b ,主要考虑井下温度及钻井液性能不稳定对压耗计算的影响;引入系数 Z_a ,主要考虑井眼不规则对压耗计算的影响; K_f 为扶正器压耗计算系数,钻柱中加有扶正器会使环空压耗增加; K_s 为地面管汇压耗计算系数。则有适用于直井、斜井、小井眼钻进等多种井况下,钻井循环压耗计算的较为通用的数学模式。

对管内流动:

$$p_i = Z_b \left(\frac{2A_i}{\pi} \right)^{1.8} \cdot \frac{\mu^{0.2} \rho^{0.8} Q^{1.8} L}{d^{4.8}} \quad (5)$$

对环空流动:

$$p_a = Z_a Z_b \left(\frac{2A_a}{\pi} \right)^{1.8} \cdot \frac{\mu^{0.2} \rho^{0.8} Q^{1.8} L}{(D_h + D)^{1.8} (D_h - D)^3} \quad (6)$$

对钻井循环系统:

$$\begin{aligned} p_L &= p_s + p_i + p_a + p_f N \\ &= K_s B Q^{1.8} + Z_b f_i B (MPI + MCI) Q^{1.8} \\ &\quad + Z_b Z_a f_a B (MCA + MPA) Q^{1.8} + K_f B Q^{1.8} N \\ &= B [K_s + Z_b f_i (MPI + MCI) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ Z_b Z_a f_a (MCA + MPA) + K_f N] Q^{1.8} \\ &= BK_L Q^{1.8} \end{aligned} \quad (7)$$

其中:

$$K_L = [K_s + Z_b f_i (MPI + MCI) + Z_b Z_a f_a (MCA + MPA) + K_f N]$$

$$MPI = \sum_{i=1}^n \frac{L_{pi}}{d_{pi}^{4.8}} \quad MPA = \sum_{i=1}^n \frac{L_{pi}}{(D_h + D_{pi})^{1.8} (D_h - D_{pi})^3}$$

$$MCI = \sum_{j=1}^m \frac{L_{cj}}{d_{cj}^{4.8}} \quad MCA = \sum_{j=1}^m \frac{L_{cj}}{(D_h + D_{cj})^{1.8} (D_h - D_{cj})^3}$$

$$f_i = \left(\frac{2A_i}{\pi} \right)^{1.8} \quad f_a = \left(\frac{2A_a}{\pi} \right)^{1.8}$$

Z_a 、 Z_b 、 K_f 、 K_s 是在现场实地测试确定的系数,把实际钻井循环系统看成一实验系统,通过实时测试收集必要数据,从而确定出这四个系数值,这就能准确地反映实际钻进中各种因素对压耗计算的影响。把 Z_a 、 Z_b 、 K_f 、 K_s 引入压耗计算式,进行压耗计算的实时修正,使修正的压耗计算模式能通用于各种井况的钻井循环压耗计算。本数学模式是一种动态模式,模式中系数 Z_a 、 Z_b 、 K_f 、 K_s 不是一个确定值,必须在每口井钻井过程中作实时系数修正,测得的每口井、每个井段、每种井况下的系数值可能不同。

三、修正系数的现场获取方法

1. 实测地面管汇压耗计算系数 K_s

基本原理式: $p_1 = K_s B Q_1^{1.8}$ 。对一定的钻井地面管汇,在只接方钻杆,用排量 Q_1 循环(取常用钻井排量),待压力表读数基本稳定后,记录泵压(或立压) p_1 ,钻井液性能参数,由上式便可求出 K_s 。

2. 实测扶正器压耗计算系数 K_f

基本原理式: $p_L = p_2 - p_b$ 及式(7)。①由前述实测一已测出系数 K_s ;②按设计连接钻柱下入井内,在已固井套管内某一井深处 H_f (取 $H_f = 500 \sim 700$ m),以本井段钻进的转速旋转钻柱,用本井段钻进的循环排量 Q_2 循环,待压力表读数稳定后,记录泵压(或立压) p_2 ,钻井液性能参数,套管串内径,扶正器数量及尺寸,钻头上装用喷嘴的 A_c 及 c 值,钻柱结构及尺寸。在本次实测数据的计算中,取 $Z_b = 1$, $Z_a = 1$,由原理式可 K_f 。

3. 实测压耗计算的修正系数 Z_b

基本原理式: $p_L = p_3 - p_b$ 及式(7)。在下钻过程中,根据需要,当钻头位于套管鞋时(H_z 井深),进

行循环测试。已下套管越深,测得的 Z_b 值越具代表性。①在前述测试中,已确定出 K_s 、 K_f 系数;②以该井段的钻进转速旋转钻柱,以该井段的钻进循环排量 Q_3 循环,待压力表读数基本稳定后,记录泵压(或立压) p_3 及其它数据(同实测2)。在本次实测数据的计算中,取 $Z_a=1$,由原理式便可求出压耗计算的修正系数 Z_b 。使用时计算 $\Delta Z_b = \frac{Z_b - 1}{H_z}$,对 H_L 井深处的计算取 $Z_b = 1 + \Delta Z_b H_L$ 。

4. 实测压耗计算的修正系数 Z_a

基本原理式: $p_L = p^i - p^b$ 及式(7)。在每次起钻换钻头前,在正常钻进状态下。①前述测试中,已确定出 K_s 、 K_f 、 Z_b 系数;②以该井段的钻进转速旋转钻柱,以该井段的钻进循环排量 Q_1 循环,待压力表读数基本稳定后,记录泵压(或立压) p^i ,钻头直径及其它数据(同实测2),由原理式便可求出压耗计算的修正系数 Z_a 。以上实测的 K_s 、 K_f 、 Z_b 、 Z_a 系数,供下一井段钻井循环压耗计算时应用,以便能及时对压耗计算模式作修正,从而提高压耗计算的准确度和钻井水力参数设计的合理性。

四、应用实例

在某油田东弯1井运用本方法求算钻井循环压耗的准确性。该井钻进到1981.02 m后下入 $\varnothing 339$ mm套管固井,套管壁厚为12.19 mm,下一井段钻进使用钻井液性能:钻井液密度1.27 g/cm³,旋转粘度计600转读数137及300转读数105;钻头上装用喷嘴; $d_1 = 15.2$, $d_2 = 14.1$, $d_3 = 13.1$ mm及 $c = 0.98$;钻具组合:钻头 $\varnothing 311$ mm+扶正器+钻铤 $\varnothing 228$ mm(内径76.2 mm,一根)+扶正器+钻铤 $\varnothing 228$ mm(内径76.2 mm,一根)+扶正器+钻铤 $\varnothing 228$ mm(内径76.2 mm,一根)+钻铤 $\varnothing 203$ mm(内径76.2 mm,八根)+钻铤 $\varnothing 178$ mm(内径71.4 mm,十一根)+钻杆 $\varnothing 139.7$ mm(内径118.6 mm) L_p 。

(1)实测系数 K_s :按实测1方法,记录循环排量 $Q_1 = 50$ L/s,泵压(或立压) $p^i = 1.0$ MPa,求出地面管汇压耗计算系数 $K_s = 907362.9$ 。

(2)实测系数 K_f :在已固井套管内 $H_f = 600$ m井深处,按实测2方法,记录循环排量 $Q_2 = 50$ L/s,泵压(或立压) $p^e = 16.2$ MPa,求出 $3K_f = 1606116$ 。

(3)实测系数 Z_b :在下钻过程中,根据需要,当钻头位于套管鞋以上81 m左右时(测试井深 $H_z = 1900$ m),按实测3方法,记录循环排量 $Q_3 = 50$ L/s,

泵压(或立压) $p^3 = 19.2$ MPa,求出 $Z_b = 0.9608$ 。

(4)实测系数 Z_a :在 $H_L = 2600$ m起钻换钻头前的正常钻进状态下,按实测4方法,记录循环排量 $Q_4 = 50$ L/s, $p^i = 20.7$ MPa,求出 $Z_a = 0.61905$ 。

换钻头后继续钻进到井深3100 m时,按 $Q = 50$ L/s循环实测得 $p_L = p^s - p^b = 14.3$ MPa;按修正系数的压耗计算模式计算得 $p_L = 14.38$ MPa。

五、结论

(1)实际钻井循环过程应看成全过程均为紊流的流动过程进行压耗计算。

(2)实际钻井循环压耗计算的影响因素多样而复杂,很难把一固定的数学模式用于各种工况下的压耗计算。把实际钻井循环系统看成一实验系统,通过实时地进行循环测试,确定修正系数,引入压耗计算式,对压耗计算模式作实时修正,使数学模式成为一动态模式,可大大提高循环压耗计算的准确度和通用性,适用于直井、斜井、水平井等多种井况。

(3)修正系数的测试方法简便,易于现场实现。

(4)理论分析及应用表明,本修正系数方法所得结果与实钻循环压耗比较具有相当好的符合性。

符号说明

d 为管路内径 cm; D_b 为井径 cm; D 为管路外径 cm; L 为管路长度 m; ρ 为钻井液密度 g/cm³; v 为钻井液在管路中的平均流速 m/s; f 为管路的水力摩阻系数(无因次); p_i , p_a 为压降 10⁵ Pa; μ 为牛顿流体粘度 Pa·s; Q 为钻井液流量 L/s; Re 为牛顿流体雷诺数; p_b 为钻头压力降 Pa; N 为钻柱中装用扶正器个数; p_g 为地面管汇压耗; p^i 为装用一个扶正器的压耗; MPI , MPA , MCI , MCA 为称管路特征系数; n 为钻柱中钻杆串数; m 为钻柱中钻铤串数; L_{pi} , d_{pi} , D_{pi} 为第 i 段钻杆串长度,内径和外径; L_{pj} , d_{pj} , D_{pj} 为第 j 段钻铤串长度,内径和外径。

参考文献

- 1 Marken C D. The influence of drilling conditions on annular pressure losses. SPE 24598. 1992
- 2 刘希圣主编. 钻井工艺原理(中册). 北京:石油工业出版社, 1988
- 3 法国石油研究院编. 钻井数据手册. 北京:地质出版社, 1982
- 4 李少池. 小井眼环空水力学评述. 石油钻采工艺, 1997; 19(5)

(收稿日期 2005-01-19 编辑 钟水清)