

基于井内实时水力学模型的环空压力计算及分析

李亚刚¹, 冯 辉², 王文深¹, 刘艳杰³, 赵光耀¹, 刘 伟¹

(1. 河南省地质矿产勘查开发局第四地质矿产调查院, 河南 郑州 450000; 2. 河南豫矿地质勘查投资有限公司, 河南 郑州 450000; 3. 河南省地质调查院, 河南 郑州 450000)

摘要: 实时水力学模型是现代钻井工程用于预测井下情况最重要的方法之一, 通过分析实时水力学模型的影响因素, 建立了一套井筒实时水力学计算与分析模型, 包括井筒环空压力和当量循环密度(ECD)的计算。该模型充分考虑了钻柱旋转对速度分布的影响。同时, 模型紧密结合参数随温度压力和工况的变化, 使计算结果更加贴近井下实际情况, 提高了该水力学模型计算结果的准确性, 使之更具实用性。

关键词: 实时水力学; 环空流速; 井筒压力; 当量循环密度

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)10-0022-04

Calculation and Analysis on Annulus Pressure Based on the Real-time Borehole Hydraulic Model/Li Ya-gang¹, FENG Hui², WANG Wen-shen¹, LIU Yan-jie³, ZHAO Guang-yao¹, LIU Wei¹ (1. No. 4 Institute of Geological and Mineral Resources Survey of Henan Provincial Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, Zhengzhou Henan 450000, China; 2. Henan Yukuang Geological Prospecting Investment Co., Zhengzhou Henan 450000, China; 3. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou Henan 450000, China)

Abstract: The real-time hydraulics model is one of the most important methods for modern drilling engineering to predict downhole conditions. This paper analyzes the influencing factors of real-time hydraulics model and a set of wellbore real-time hydraulic calculation and analysis model is established. The model takes into account the effect of drill string rotation on the velocity distribution. The model includes the wellbore annular pressure and equivalent circulating density. At the same time, by using the established hydraulic calculation and analysis model, the calculation results are more close to the actual underground situation according to the parameter changes along with the different temperatures and working conditions, which makes this model more practical.

Key words: real-time hydraulics model; annulus velocity; wellbore pressure distribution; equivalent circulating density

0 引言

在钻井过程中及时准确地掌握井筒和环空水力学状况, 控制当量循环密度(ECD)在合理范围内, 对解决预防岩屑床的形成及排除钻孔内的岩屑、提高清洗效率、快速冷却钻头、提高水功率利用、优化钻探过程、控制气侵、及时发现井下溢流井涌和井壁垮塌、发现和保护油气层、控制井下压力、控制“激动”/抽汲压力在合理范围内等实际问题是至关重要的。本文基于实时测量的钻井数据, 综合已有的一些理论模型, 建立井筒实时水力学模型的方法, 为预测井内复杂情况做一定的研究探索, 对于改进钻井工程方案设计、施工监测及作业优化, 具有十分重要的意义^[1-3]。

1 环空实时水力学计算模型

1.1 参数与温度压力变量的关系式

简化温度随深度变化的计算式^[4-5]如下:

$$T = T_0 + 0.025H$$

式中: T ——实际井眼深度对应的井内温度, 即 H 深度处的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_0 ——地表测量参数时的温度, $^{\circ}\text{C}$; H ——计算深度, m 。

流性指数 n 和稠度系数 K 与温度压力的关系式^[6-7]:

$$n = n_0 e^{[-0.0245 - 0.6436(P/T) + 0.0029P]}$$

$$K = K_0 e^{[0.8337 + 1.4127(P/T) - 0.0066P]}$$

式中: n_0 ——常温常压下的流性指数; K_0 ——常温常压下的稠度系数; P ——压力, Pa ; T ——温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

收稿日期: 2017-04-01; 修回日期: 2017-08-01

基金项目: 河南省重大科技专项项目“河南页岩气勘查开发及示范应用研究”(编号: 151100311000); 国土资源部第二轮页岩气探矿权项目“河南中牟页岩气勘查”(编号: GT2012YQTKQR0020)

作者简介: 李亚刚, 男, 汉族, 1988年生, 从事石油钻井、地热钻井技术研究工作, 河南省郑州市郑开大道康庄路地矿大厦, 569509543@qq.com。

1.2 计算环空压力和 ECD

由于温度压力对于密度的影响较小,所以在这里忽略密度随温度压力的变化^[6-7]。

计算泰勒数 T_a :

$$T_a = \frac{\rho[(D_2 - D_1) \times 1000]^{n+0.5} D_1^{1.5-n} \omega^{2-n}}{4K}$$

式中: T_a ——泰勒数; ρ ——地面钻井液密度,kg/m³; D_2 ——井眼直径,m; D_1 ——钻柱外径,m; n ——流性指数; ω ——角速度,rad/s; K ——钻井液稠度系数。

计算幂律流体雷诺数 R_e ^[8-9]

$$R_e = \frac{10 \times 1200^{1-n} (D_2 + D_1)^n v_0^{2-n} \rho}{K \left(\frac{2n+1}{3n} \right)^n}$$

当 $R_e = 1000$ 时,

$$B_{\max} = 0.2475 \ln T_a + 0.2706$$

当 $R_e = 2000$ 时,

$$B_1 = 0.2305 \ln T_a + 0.1047$$

当 $R_e \geq 5700$ 时,

$$B_2 = 0.1056 \ln T_a + 0.5979$$

式中: B ——钻柱旋转造成的影响系数; $\bar{v}_0$ ——平均流速,m/s。当雷诺数为其他值时,采用如下公式^[10-12]:

当 $1000 < R_e < 2000$ 时,

$$B = \frac{R_e - 2000}{1000 - 2000} B_{\max} + \frac{R_e - 1000}{2000 - 1000} B_1$$

当 $2000 < R_e < 5700$ 时,

$$B = \frac{R_e - 5700}{2000 - 5700} B_1 + \frac{R_e - 2000}{5700 - 2000} B_2$$

当 $R_e \leq 3470 - 1370n$ 时,为层流,层流时偏心修正系数 A_{lam} :

$$A_{\text{lam}} = 1 - 0.072 \left(\frac{e}{n} \right) \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{0.8454} - 1.5en^{0.5} \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{0.1852} + 0.96en^{1/3} \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{0.2527}$$

当 $R_e > 3470 - 1370n$ 时,为紊流,紊流时偏心修正系数 A_{turb} :

$$A_{\text{turb}} = 1 - 0.048 \left(\frac{e}{n} \right) \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{0.8454} - (2/3)en^{0.5} \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{0.1852} + 0.285en^{1/3} \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{0.2527}$$

式中: e ——偏心率。

计算层流时环空压耗 Δp ^[13-15]

$$y = 0.37n^{-0.14}$$

$$z = 1 - (1 - c^y)^{(1/y)}$$

$$G = \left(1 + \frac{z}{2} \right) \frac{(3-z)n+1}{(4-z)n}$$

$$\Delta p = \frac{2KL}{R_2 - R_1} \left(\frac{4 \bar{v}_0 G}{R_2 - R_1} \right)^n$$

式中: x, y, G ——无量纲参数; c ——钻杆外径与套管或裸眼井段半径的比值; L ——井段长度,m; R_2 ——套管或裸眼井段半径,m; R_1 ——钻柱外半径,m。

计算紊流时环空压耗 Δp ,由经验公式得摩擦系数 f :

$$f = aR_e^{-b}$$

对幂律流体, a, b 表达式如下:

$$a = (\log n + 3.93)/50$$

$$b = (1.75 - \log n)/7$$

$$\Delta p = 32.4 \times \frac{f \rho H Q^2}{(R_2 - R_1)^3 (R_2 + R_1)^2}$$

带入修正系数的环空压力分布:

$$P = p_h + \Delta p = \rho g H + AB \Delta p$$

式中: P ——环空压力,Pa; p_h ——静液柱压力,Pa; A ——偏心修正系数; B ——钻柱旋转造成的影响系数。

计算当量循环密度 ECD:

$$ECD = P/(gH)$$

2 程序设计

本文程序设计采用 VB 程序语言,设计操作界面如图 1 所示。界面的左边版面是数据输入板块,需要输入的参数包括流性指数、稠度系数、地面的温度、钻柱钻速、环空外半径、环空内半径、钻井液密度、钻井液流量、测量点的深度以及井筒的偏心率,各个数据的单位也进行了标注,这些数据都是可以直接从地面得到的;右边版面是数据输出板块,设计了环空压力和当量循环密度的程序,在界面上可以直接显示环空压力和当量循环密度。本程序操作简单,适合现场工人实际操作,降低了操作门槛,并且实现了可视化界面,将公式打包锁定,防止现场工作

图1 程序界面

人员误操作更改计算公式,导致数据误差。本文参考中牟页岩气区块牟页 1 井数据,其基本测量数据是流性指数 0.8,稠度系数 2.0,地面温度 15 ℃,钻柱转速 15 rad/s,环空外半径 0.1738 m,环空内半径 0.06985 m,钻井液密度 1.1 g/cm³,钻井液流量 0.03 m³/s,偏心度 0.1,在模拟过程中改变某一参数,验证其对环空压力的影响。

3 计算实例分析

本文以牟页 1 井的基本测量数据为基础数据进行不同参数模拟测试,分别分析不同流性指数、不同稠度系数、不同环空间隙、不同钻井液密度下的环空压力。

表 1 统计了随着深度的变化不同流性指数(0.2、0.5、0.65、0.8)下的环空压力。图示化表 1 中的数据,得到图 2。从图 2 中可以看出,环空压力随流性指数的增加而增加,并且随着深度的增加,环空压力增加越多,但幅度不大,所以流性指数的变化对环空压力影响很小。

表 1 不同流性指数下的环空压力 kPa				
深度/m	流性指数			
	0.8	0.65	0.5	0.2
200	2312	2296	2281	2421
500	5733	5685	5642	5911
1000	11451	11329	11226	11062
1500	17206	16990	16814	16551
2000	22992	22665	22408	22039
3000	34622	34045	33608	33013

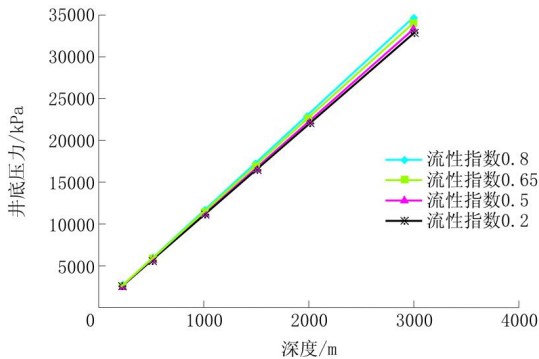


图 2 不同流性指数下的环空压力

表 2 统计了随着深度的变化不同稠度系数(0.5、1.0、1.5、2.0)下的环空压力。图示化表 2 中的数据,得到图 3。从图 3 可以看出,环空压力随着稠度系数的增加而增加,并且随着深度的增加环空压力增加越大,但是稠度系数对环空压力的影响很小。

表 2 不同稠度系数下的环空压力 kPa				
深度/m	稠度系数			
	2.0	1.5	1.0	0.5
200	2312	2274	2235	2219
500	5733	5649	5564	5519
1000	11451	11286	11121	11009
1500	17206	16951	16697	16500
2000	22992	22640	22287	21995
3000	34622	34060	33498	32990

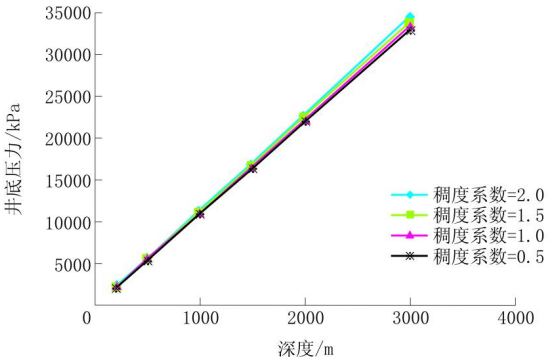


图 3 不同稠度系数下的环空压力

表 3 统计了随着深度的变化不同环空间隙(内径 44.5 mm,外径 74.6 mm;内径 57.15 mm,外径 107.95 mm;内径 69.85 mm,外径 134.95 mm;内径 69.85 mm,外径 173.8 mm)下的环空压力,图示化表 3 中的数据,得到图 4。从图 4 中可以看出,环空间隙的大小对环空压力的影响很大,环空压力随着环空间隙的减小而增大,当外半径小到一定程度时,环空压力曲线发生剧烈的变化,这是由于环空间隙减小导致钻井液在环空中的流态发生了变化,从而引起压耗与之前的计算模式出现了不同,到达了小井眼的范围。

表 3 不同环空间隙下的环空压力 kPa				
深度/m	环空间隙/mm			
	外半径 173.8, 内半径 69.85	外半径 134.95, 内半径 69.85	外半径 107.95, 内半径 57.15	外半径 74.6, 内半径 44.45
200	2312	2930	2161	
500	5733	6119	8162	
1000	11451	12384	13445	
1500	17206	18854	20865	51874
2000	22992	25485	28682	45086
3000	34622	39083	45178	78859

表 4 统计了随着深度的变化不同钻井液密度(1.05、1.1、1.25、1.5 g/cm³)下的环空压力,图示化表 4 中的数据,得到图 5。从图 5 中可以看出,钻井液密度的变化对环空压力有着很大的影响,环空压力随着钻井液密度的增大而增大,因为钻井液密度

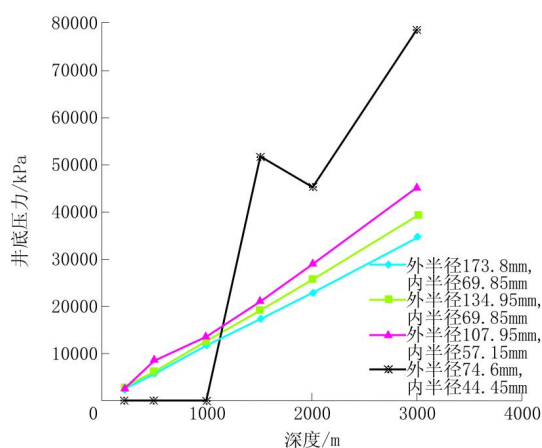


图4 不同环空间隙下的环空压力

表4 不同钻井液密度下的环空压力 kPa

深度/m	钻井液密度/(g·cm ⁻³)			
	1.05	1.1	1.25	1.5
200	2214	2312	2606	3097
500	5488	5733	6469	7695
1000	10961	11451	12923	15375
1500	16471	17206	19414	23093
2000	22011	22992	25935	30840
3000	33151	34622	39037	46395

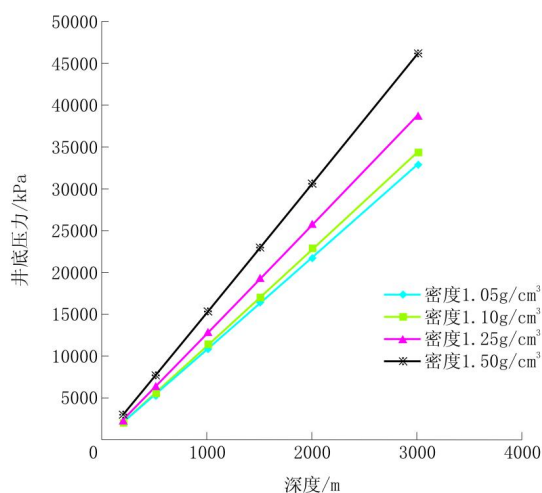


图5 不同钻井液密度下的环空压力

直接影响了环空压力中的静液柱压力部分,而且增大的趋势也在增加,基本保持在一次线性的关系。

4 结论

本文建立了一个包含了环空流速分布,环空压力分布和当量循环密度的实时水力学模型,计算结果侧重于分析流性指数、稠度系数、环空间隙和钻井液密度对钻井环空压力的影响。

(1)环空压力随着流性指数的减小而降低,但

幅度不大,改变流性指数不能很好地改变环空压力。

(2)环空压力随着稠度系数的减小而降低,但幅度不大,改变稠度系数不能很好地改变环空压力。

(3)环空压力随着环空间隙的减小而增大,当外半径小到一定程度时,环空压力曲线发生了波折,当钻井到地层深部的时候就会出现这种情况,应该提早做准备,预防出现意外。

(4)钻井液密度的变化对环空压力有着很大的影响,环空压力随着钻井液密度的增大而增大,而且增大的趋势增加,基本保持在一次线性的关系,因此可以通过改变钻井液密度来调节环空压力。

(5)本文只对某单因素进行了分析,未研究参数的综合因素对环空压力的影响,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘建立,陈会年,高炳堂. 国外随钻地层压力测量系统及其应用[J]. 石油钻采工艺,2010,32(1):94-98.
- [2] 张奎林. 精细控压钻井井筒压力控制技术研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2013.
- [3] 熊继有,荣继光,田志欣,等. 基于智能钻柱的控压钻井溢流实时评价方法[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2013,35(3):85-90.
- [4] 管志川. 温度和压力对深水钻井油基钻井液柱压力的影响[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2003,27(4):48-52.
- [5] 周华安. 高密度钻井液流变模式及其参数计算方法选择[J]. 钻采工艺,1995,(1):82-85.
- [6] 易灿,闫振来,赵怀珍. 超深井水基钻井液高温高压流变性试验研究[J]. 石油钻探技术,2009,37(1):10-13.
- [7] 宋洵成,王振飞,韦龙贵,等. 温度压力与钻井液密度相互影响规律研究[J]. 内蒙古石油化工,2012,(5):1-3.
- [8] 严维锋,郑何光,马路,等. 钻柱偏心和旋转对环空压耗的影响[J]. 内蒙古石油化工,2010,36(8):51-53.
- [9] 蒋世全. 幂律流体偏心环空间隙雷诺数及层流区域计算方法研究[J]. 中国海上油气,2009,21(3):186-189.
- [10] 宋保寰. 幂律流体偏心环空层流流动壁面切应力的数值计算及应用[C]//中国力学学会、《水动力学研究与进展》编委会、中国造船工程学会、中国石油大学(华东). 第十三届全国水动力学学术会议暨第二十六届全国水动力学研讨会论文集——E 工业流体力学. 北京:海洋出版社,2014.
- [11] 刘文红,张宁生. 小井眼钻井环空压耗计算与分析[J]. 西安石油大学学报:自然科学版,2000,15(1):6-9.
- [12] 贺成才. 偏心环状层流管流的流动规律[J]. 油气储运,2002,21(11):25-28.
- [13] 彭齐,樊洪海,周号博,等. 不同流变模式钻井液环空层流压耗通用算法[J]. 石油勘探与开发,2013,40(6):752-756.
- [14] 杨英波,李君,申延晴,等. 传统计算循环压耗方法局限性探讨及改进方法验证[J]. 石油化工应用,2016,35(7):33-36.
- [15] 高磊. 动态环空压力控制系统应用技术研究[D]. 黑龙江大庆:大庆石油学院,2009.
- [16] 张所邦,谭建国,王爱军,等. 宜昌磷矿北部整装勘查项目深孔复杂地层钻探技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(4):23-27.