

起下钻过程中井筒稳态波动压力计算方法

彭 齐, 樊洪海, 刘劲歌, 韩付鑫, 付随艺

(石油工程教育部重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249)

摘 要: 为了避免起下钻过程中井涌、井漏等复杂情况的发生, 需要提高井筒波动压力计算精度。以槽流模型为基础, 结合起下钻过程中的流体真实速度分布情况, 根据井筒流体的连续性及其相应的边界条件, 分别讨论层流、紊流状态下的波动压力, 建立了基于钻柱运动的稳态井筒波动压力计算模型, 并采用数值解法对模型进行求解。结合现场生产数据分析发现: 当起下钻速度由 0.2 m/s 增大至 0.6 m/s 时, 波动压力由 0.21 MPa 增大至 0.27 MPa; 钻柱运动速度、流体流变性等条件不变, 环空内外径之比由 0.55 增大至 0.95 时, 井筒波动压力增加幅度由 0.30 MPa 增大至 0.50 MPa。采用文献数据进行计算对比, 结果表明: Burkhardt 模型的计算误差多数大于 8%, 波动压力模型预测值与实测值的计算误差基本小于 5%, 符合精细控压钻井计算误差要求。研究结果表明, 采用井筒稳态波动压力计算方法可以精确分析非钻井过程井筒压力, 指导现场安全生产。

关键词: 波动压力; 槽流模型; 起下钻; 控压钻井

中图分类号: TE21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2016)04-0035-06

Improved Calculation of Wellbore Steady Fluctuation Pressure in Tripping Operations

PENG Qi, FAN Honghai, LIU Jin'ge, HAN Fuxin, FU Suiyi

(MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering (China University of Petroleum (Beijing)), Beijing, 102249, China)

Abstract: To eliminate the possibility of kicks, lost circulation and other complicated situations during tripping operations, it is necessary to enhance the accuracy of calculation for the wellbore fluctuation pressure. Based on the slot flow model and considering the actual velocity distribution in the wellbore, fluctuation pressure at laminar flows and turbulence flows was investigated in accordance with the continuity of wellbore fluids and corresponding boundary conditions. Eventually, steady fluctuation pressure calculation methods were established and numerical solutions were also introduced. Field production data were used to verify these models. When the velocity of the drilling string was increased from 0.2 m/s to 0.6 m/s, fluctuation pressures increased from 0.21 MPa to 0.27 MPa. Under stable drilling strings velocity and fluid rheology, fluctuation pressure of the wellbore increased from 0.3 MPa to 0.5 MPa when ID/OD ratio increased from 0.55 to 0.9. Through comparison with experiment data in published literatures, calculation errors from the Burkhardt model was over 8%, while the calculation error from the new model was less than 5%. The new model met pressures accuracy requirements in drilling operations. Research results show that the high-precision steady fluctuation pressure calculation method could be used for accurate analysis of wellbore pressures during non-drilling operations and might provide necessary guidance for secure operation onsite.

Key words: fluctuation pressure; slot flow model; tripping; pressure-controlled drilling

起下钻、下套管、注水泥等工艺流程引起的压力波动以及相关井控问题, 时刻威胁着钻井施工安全。特别是随着石油勘探的不断发展, 小井眼钻井、套管钻井^[1]及精细控压钻井等对起下钻过程中的井筒压力计算精度要求越来越高^[2], 传统的井筒波动压力计算模型已经无法满足精确计算的要求。国内外许多学者对井筒波动压力进行了研究分析^[3-6], 分别从模型理论到实验分析对波动压力进行了讨论^[7-10], 但

研究成果或者过于偏向工程应用缺乏理论支撑, 或者只注重纯理论分析而忽略其应用效果, 将两者很好地

收稿日期: 2015-09-07; 改回日期: 2016-04-15。

作者简介: 彭齐(1986—), 男, 湖北武汉人, 2010年毕业于长江大学石油工程专业, 2013年获中国石油大学(北京)油气井专业硕士学位, 在读博士研究生, 主要从事油气井流体力学方面的研究。E-mail: lao.peng@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“高压气井内高速流体诱发生产管柱振动特性研究”(编号: 51274219)部分研究内容。

结合起来的研究相对较少^[11-12]。此外,大多数波动压力计算模型在求解时均进行了大量假设简化处理^[3,13-15],影响了最终计算结果的精度。因此,笔者以槽流模型为基础,根据起下钻过程中井筒环空流体的实际流动规律,建立了稳态条件下井筒波动压力计算模型,并给出了一种较为精确的数值求解方法。

1 环空中波动压力计算模型

在起下钻过程中,若井筒内流体为含屈服值的非牛顿流体,则在层流状态下存在流速核区域,流速核内流体的流速相等^[11-13]。如图 1 所示,假设钻柱向上运动:1)靠近井壁(0≤l<l₁)的流体向下运动,流速沿井筒径向逐渐增大,该部分流体受到井壁的剪切应力、流体重力作用,处于速度剪切区域;2)处于环空中间部分(l₁≤l<l₂)的流体向下运动,该部分为流核区,流体具有相同流速;3)靠近运动钻柱(l₂≤l≤H,其中 H=R_o-R_{po},H 为环空间隙,R_o为井眼半径,R_{po}为钻柱外径)的流体,一部分随钻柱向上运动,另一部分向下运动,该区域的流体均处于速度剪切区域。

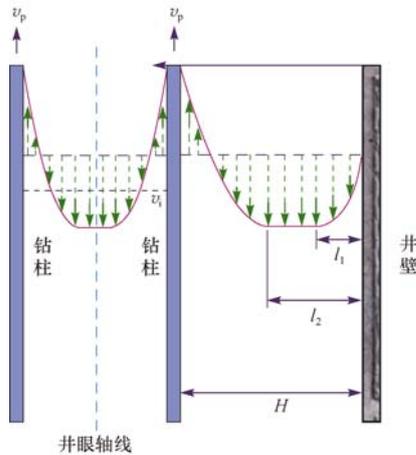


图 1 钻柱运动引起井筒流场示意

Fig. 1 Schematic drawing for wellbore flows induced by movements of drilling strings

模型假设条件为:1)不考虑钻柱旋转的影响;2)将井筒环空等效为宽 W 厚 H 的槽流模型,其中 W=π(R_o+R_{po});3)不考虑井壁的不规则性;4)流体流变性符合赫-巴模式(含屈服值);5)钻柱底端与井眼环空底部连通(底部开口管)。

1.1 第一速度剪切区

当 0≤l≤l₁ 时,称为 I 区域,随着半径增大,流

体剪切应力减小,此时有:

$$\tau_1 = -\frac{\Delta p_s}{L}l + \tau_{w,a} \quad (1)$$

式中:τ_{w,a}为管壁处的剪切应力,Pa;Δp_s为波动压力,MPa;L为井深,m;l为井壁距井眼中心的距离,m;τ₁为 I 区域的剪切应力,Pa。

在 I 区域,若将式(1)与赫-巴流体流变方程 τ=τ₀+k[-dv/dl]ⁿ 联立,并考虑边界条件 dv/dl|_{l=l₁}=0 和 v|_{l=0}=0,积分化简可得:

$$v_1 = \frac{n}{n+1} \left[\frac{\Delta p_s}{KL} \right]^{\frac{1}{n}} [(l_1 - l)^{\frac{n+1}{n}} - l_1^{\frac{n+1}{n}}] \quad (2)$$

式中:K为流体稠度系数,Pa·sⁿ;n为流性指数;v₁为 I 区域流体的流速,m/s。

1.2 第二速度剪切区

当 l₂≤l≤H 时,称为 III 区域,随着半径增大,流体所受切应力逐渐增大,此时有:

$$\tau_3(l) = \frac{\Delta p_s}{L}(l - l_2) + \tau_0 \quad (3)$$

在 III 区域,联立式(3)与赫-巴流体流变方程,并结合边界条件 v|_{l=H}=v_p,积分整理可得:

$$v_3 = v_p - \frac{n}{n+1} \left[\frac{\Delta p_s}{KL} \right]^{\frac{1}{n}} [(H - l_2)^{\frac{n+1}{n}} - (l - l_2)^{\frac{n+1}{n}}] \quad (4)$$

式中:v_p为钻柱的运动速度,m/s;v₃为 III 区域的流体流速,m/s。

1.3 流核区域

当 l₁≤l<l₂ 时,为 II 区域,该部分为流核区域,流体流速均相等,即 dv/dl|_{l₁≤l<l₂}=0。根据流体受力平衡,Δp_s(l₂-l₁)W=2τ₀WL,可得:

$$l_2 - l_1 = \frac{2\tau_0 L}{\Delta p_s} \quad (5)$$

若令 a = n/(n+1) * [Δp_s/KL]^{1/n}, b = (n+1)/n, 则式(2)、(4)可简化为:

$$v_1 = a[(l_1 - l)^b - l_1^b] \quad (0 \leq l < l_1) \quad (6)$$

$$v_3 = v_p - a[(H - l_2)^b - (l - l_2)^b] \quad (l_2 \leq l \leq H) \quad (7)$$

令 c=l₂-l₁,则由(5)可变为:

$$c = \frac{2\tau_0 L}{\Delta p_s} \quad (8)$$

在 II 区域内流体流速相等,故:

$$v_1|_{l=l_1} = v_2 = v_3|_{l=l_2} \quad (9)$$

式中: v_2 为 II 区域的流体流速, m/s。

联立式(6)、式(7)和式(9), 可得:

$$(H - c - l_1)^b - l_1^b - \frac{v_p}{a} = 0 \quad (10)$$

1.4 环空总流量

结合环空各区域的流动情况, 对式(2)、(4)和(9)积分, 整理可得环空总流量:

$$q_a = W \left\{ v_p (H - c - l_1) - a c l_1^b - \frac{ab}{b+1} [l_1^{b+1} + (H - c - l_1) b + 1] \right\} \quad (11)$$

式中: q_a 为环空流量, m^3/s 。

由井筒内流体运动的连续性可知, 钻柱与环空中的流体对井底产生的波动压力相等。若将式(10)两边同时乘以 $(H - c - l_1)$, 则式(11)可简化为:

$$q_a = \frac{W}{b+1} [v_p (H - c - l_1) - a(bH + c) l_1^b] \quad (12)$$

2 钻柱内波动压力计算模型

钻柱向上运动过程中, 钻柱内流体会填充钻柱运动后的空余空间, 整体向下流动(见图 1)。假设钻柱内流体向下流动的平均速度为 v_i , 钻柱向上运动的平均速度为 v_p , 则管内流体相对于钻柱运动的速度为 $v_p + v_i$ 。A. T. Bourgoyne Jr. 等人^[5]和 S. A. Bernt 等人^[14]研究指出, 在相对速度相同条件下, 圆管轴向运动时钻柱内流体的速度剖面与泵驱流体运动时圆管内的速度剖面是相同的。基于 R. O. Herzog 等人^[15]的推导过程, 结合赫-巴模式的本构方程, 可得钻柱内的流量方程为^[16]:

$$q = \frac{n\pi D_{pi}^3}{8(3n+1)} \left(\frac{\tau_{w,p}}{K} \right) \frac{1}{n} \left[1 - \frac{\tau_0}{\tau_{w,p}} \right]^{\frac{n+1}{n}} \left[1 + \frac{2n}{2n+1} \left[\frac{\tau_0}{\tau_{w,p}} \right] + \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \left[\frac{\tau_0}{\tau_{w,p}} \right]^2 \right] \quad (13)$$

式中: q 为流体相对运动钻柱的体积流量, m^3/s ; $\tau_{w,p}$ 为环空管壁内切应力, Pa; D_{pi} 为钻柱内径, m。

若令钻柱运动引起的井筒中总流量为 q_{net} , 根据上述假设, 则有:

$$q_{net} = \frac{\pi}{4} (D_{po}^2 - D_{pi}^2) v_p \quad (14)$$

$$v_i = \frac{4q}{\pi D_{pi}^2} - v_p \quad (15)$$

$$q_p = \frac{\pi D_{pi}^2}{4} v_i \quad (16)$$

$$q_a = q_{net} - q_p \quad (17)$$

式中: q_p 为钻柱内实际流量, m^3/s ; q_{net} 为钻柱运动引起的总流量, m^3/s 。

而圆管内产生的压力梯度为:

$$\frac{\Delta p_{s,p}}{L} = \frac{4\tau_{w,p}}{D_{pi}} \quad (18)$$

3 模型的求解

层流状态下, 赫-巴流体在圆管、环空中的雷诺数可分别表述为^[17]:

$$Re_p = \frac{8^{1-n} \rho D_{pi}^n v_{pf}^{2-n}}{K \left[\frac{3n+1}{4n} \right]^n \left[1 + \frac{3n+1}{2n+1} \left[\frac{n}{3n+1} \right]^n \left(\frac{D_{pi}}{2v_{pf}} \right)^n \frac{\tau_0}{K} \right]} \quad (19)$$

$$Re_a = \frac{12^{1-n} \rho (D_h - D_{po})_{hy}^n v_{af}^{2-n}}{K \left[\frac{2n+1}{3n} \right]^n + \left[\frac{2n+1}{n+1} \right] \left[\frac{D_h - D_{po}}{12v_{af}} \right]^n \tau_0} \quad (20)$$

式中: Re_p , Re_a 分别为钻柱、环空中流体的雷诺数; D_h 为井径, m; D_{po} 为钻柱外径, m; v_{pf} 为钻柱与钻柱内流体平均速度的相对值, m/s; v_{af} 为钻柱与环空中流体平均速度的相对值, m/s。

根据广义流性指数对流态的判别标准^[18-19], 可得:

$$Re_c = 3470 - 1370n' \quad (21)$$

$$\text{其中 } n' = \begin{cases} \frac{d \ln \tau_{w,p}}{d \ln \left[\frac{8v_{pf}}{D_{pi}} \right]} & (\text{圆管内}) \\ \frac{d \ln \tau_{w,a}}{d \ln \left[\frac{12v_{af}}{D_h - D_{po}} \right]} & (\text{环空}) \end{cases} \quad (22)$$

式中: Re_c 为临界雷诺数。

若判定为紊流 ($Re > Re_c$) 状态时, 则采用 T. D. Reed 等人^[19]给出的粗糙管紊流经验公式:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{4}{n^{0.75}} \lg [Re^f (1 - n')] - \frac{0.395}{n^{1.2}} \quad (23)$$

因此, 紊流条件下井筒中的波动压力计算公式可表述为:

$$\Delta p_{s,p} = 2f\rho \frac{\bar{v}^2}{D_{pi}} L \quad (24)$$

$$\Delta p_s = 2f\rho \frac{\hat{v}^2}{D_h - D_{po}} L \quad (25)$$

式中: f 为范宁阻力系数。

由上述推导过程可知, 该波动压力计算模型(简

称新模型)无法给出显式的解析解方程。因此,采用逆序假设的数值求解思路进行分析,其具体求解过程如图 2 所示。其中,关键参数管壁处剪切应力 $\tau_{w,p}$ 采用黄金分割法迭代求解,环空流道参数 l_1 采用二分法迭代求解。

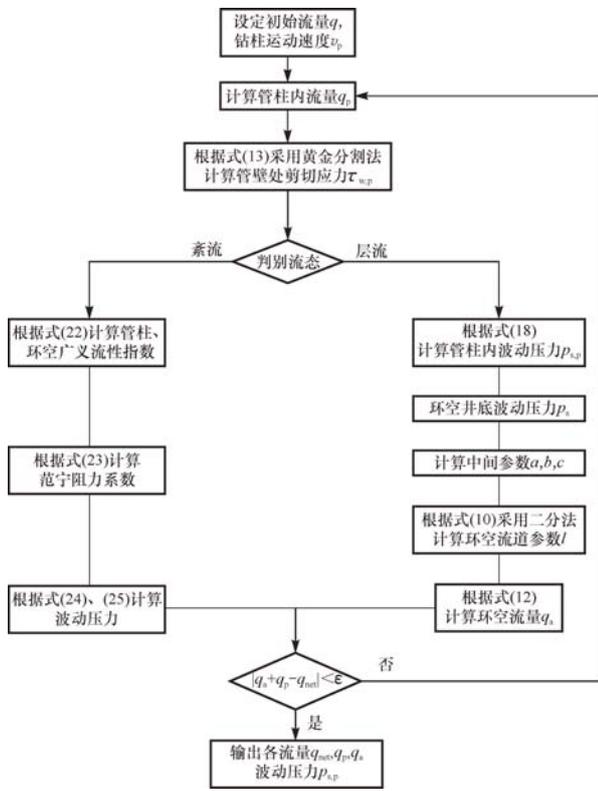


图 2 波动压力计算流程

Fig. 2 Flow chart for calculation of fluctuation pressures

4 实例计算

根据现场生产数据,分析某井钻柱上提过程中产生的波动压力。所需基本参数如下:钻柱外径 $D_{po} = 0.127\text{ m}$, 钻柱内径 $D_{pi} = 0.108\text{ m}$, 井眼直径 $D_h = 0.216\text{ m}$, 井深 $L = 1\ 000\text{ m}$ 。赫-巴流体流变性参数:屈服值 $\tau_0 = 2.85\text{ Pa}$, 稠度系数 $K = 0.372\ 5\text{ Pa} \cdot \text{s}^n$, 流性指数 $n = 0.685\ 7$ 。根据波动压力计算流程,基于上述波动压力计算模型,可分别得到井筒波动压力与钻柱运动速度的关系(见图 3);钻柱体积流量(系统流量)、钻柱内和环空中流体流量与钻柱运动速度的关系(见图 4)。

由图 3 可以看出,钻柱速度从 0.2 m/s 增大到 0.6 m/s 的过程中,井筒波动压力由 0.21 MPa 增加到 0.27 MPa 。由图 4 可以看出,钻柱上提过程中的环空流体整体表现为向上运动,且随着钻柱运动速度的增加,环空中流体向上运动的流量亦增加;而钻

柱内的流体恰恰相反,其流动方向与钻柱运动相反,且随着钻柱运动速度的增加,钻柱内流体向下运动的流量也增加。整体来看,钻柱上提过程中,井筒中为正循环的流场。

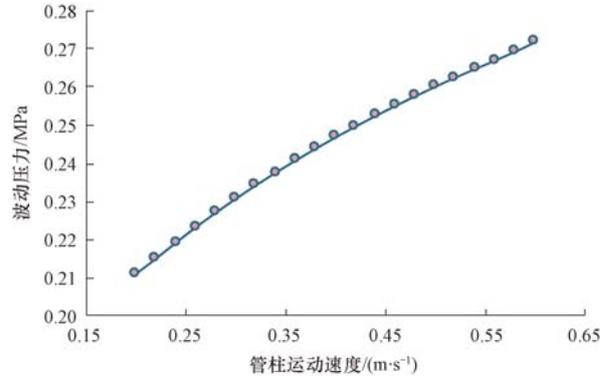


图 3 波动压力与钻柱运动速度的关系曲线

Fig. 3 Correlation between fluctuation pressure and the velocity of drilling string

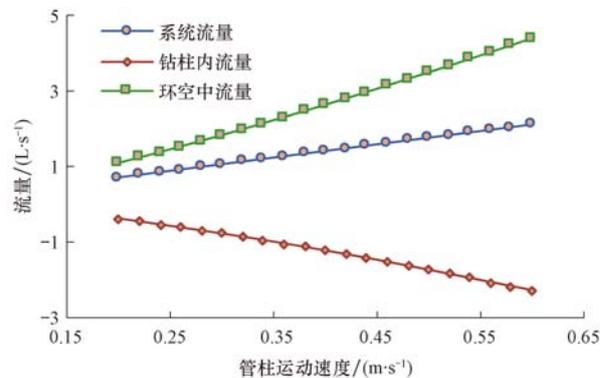


图 4 井筒各区域流量与钻柱运动速度的关系曲线

Fig. 4 Correlation between flow rates and velocities of drilling strings in various parts of the wellbore

在 $v_p = 0.4\text{ m/s}$ 、其他参数不变的情况下,井筒中各区域的流量随环空内外径之比 $\phi (\phi = D_{po}/D_h)$ 的变化关系如图 5 所示。

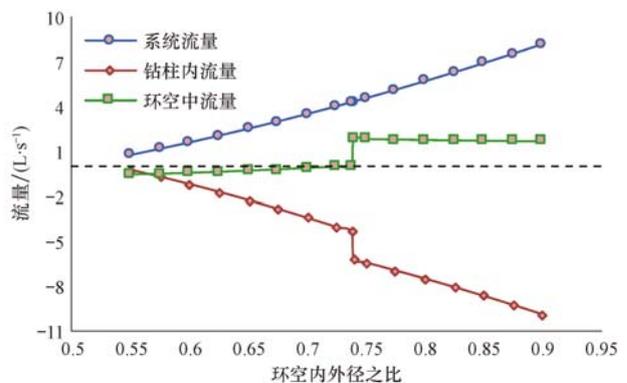


图 5 井筒各流动区域流量与环空内外径之比的关系曲线

Fig. 5 Correlation between flow rates and the ID/OD ratios of annular spaces in various parts of the wellbore

由图 5 可知,当钻柱运动速度不变时,钻柱内流量随着 ϕ 的减小而减小,且钻柱内流体始终沿钻柱反方向流动;而环空流量随 ϕ 的减小先小幅度增加,继而突然减小并趋近于 0,最后向钻柱运动的反方向小幅度缓慢增加。

图 5 中钻柱内/环空中流量在 ϕ 的变化过程中之所以会产生突变,主要原因是流体流态发生了变化。当 $0.73 < \phi < 0.75$ 时(中等环空间隙),该区域为不稳定流动区域,随 ϕ 的增大,一方面环空间隙不断被压缩,另一方面钻柱运动引起的系统流量也不断增加,导致环空中流体的流态由层流向紊流发生转变,因而环空流体流速明显增加,由于井筒流体流动的连续性,导致钻柱内流体的流量也增加,故而波动压力突增;当 ϕ 为 $0.53 \sim 0.73$ 或 $0.75 \sim 0.90$ 时,随着 ϕ 增大,虽然钻柱内、环空中流体的流量均增加,但流体的流态并没有发生改变,故而波动压力平稳增加(见图 6)。

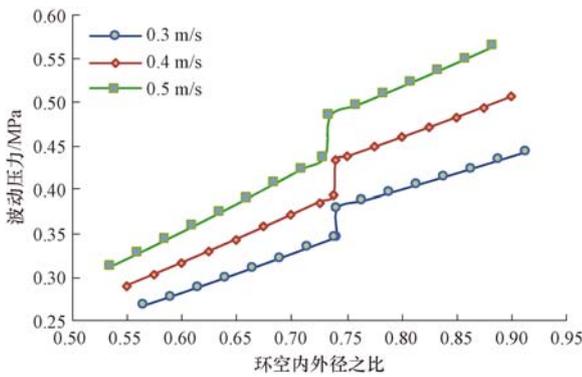


图 6 不同流速下波动压力与环空内外径的关系曲线

Fig. 6 Correlation between fluctuation pressures and the ID/OD ratios of annular spaces under various flow rates

采用 3 种不同屈服值的钻井液,分析各屈服值条件下井筒波动压力与钻柱运动速度的关系(取 $\phi = 0.588$),计算结果如图 7 所示。

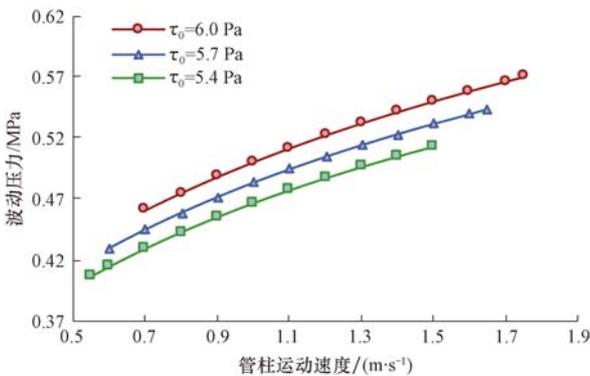


图 7 井筒波动压力与钻柱运动速度的关系

Fig. 7 Correlation between fluctuation pressure and the velocity of drilling strings

由图 7 可知:1)在低、中、高 3 种屈服值状态下,井筒波动压力均随着钻柱运动速度的增加而增加;2)钻柱运动速度相同时,较高屈服值条件下对应的波动压力也较大;3)随着钻井流体屈服值的逐渐增大,钻柱的运动速度对波动压力的影响很小。

为了进一步验证新模型的适用性与准确性,采用文献[2]中的实验数据对该模型进行计算验证。文献[2]中 Burkhardt 模型选用宾汉流体计算,其屈服值为 3.8304 Pa ,塑性黏度为 $0.12 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,实验测量点分布在长度为 609.60 m 的管柱上。为了便于直观分析结果,对管柱运动时产生的波动压力梯度进行计算分析,其计算结果如图 8 所示。由图 8 可知,相比 Burkhardt 模型,波动压力计算新模型与实测值更加接近,不论是在层流条件还是在紊流条件下都与实测值吻合得很好。2 种模型与实测值之间的计算误差如图 9 所示,新模型与文献实际测量值之间的误差很小,基本都小于 5% ,而 Burkhardt 模型的计算误差多数大于 8% 。新模型误差较小的主要原因为:模型推导过程未作简化处理,采用高精度的数值

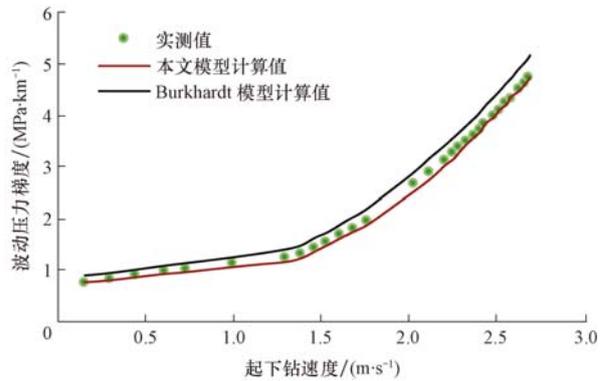


图 8 波动压力计算值与文献测量值的对比曲线

Fig. 8 Comparison of calculated values of fluctuation pressure with measured values specified in relevant references

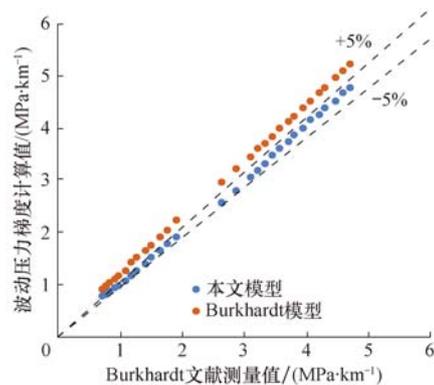


图 9 波动压力计算误差分析

Fig. 9 Errors in the calculation of fluctuation pressures

解法,使用与流体流变性相符合的流变模式进行分析。

5 结论

1) 以槽流模型为基础,根据起下钻过程中井筒的真实流动情况,采用通用流量计算方法,建立了稳态波动压力计算模型,并采用数值解法求解,提高了模型计算结果的精度。

2) 与前人波动压力的计算方法相比,新模型在计算井筒流量的过程中未作简化处理,井筒流体流动规律更加符合真实情况;由于采用迭代求解的数值解法,导致新模型的求解过程相对复杂。

3) 井筒波动压力随着钻柱运动速度的增加而增加,随钻柱运动速度增加环空近管壁处剪切区的厚度增加,而流核区厚度减小。此外,在其他条件不变时,随着环空内外径之比增大,井筒波动压力也逐渐增大。

4) 采用文献数据对提出的波动压力计算模型进行了验证,结果表明:波动压力计算新模型的计算结果与实测值具有较高的吻合度,研究结果对于后续波动压力的研究具有一定的指导作用。

参 考 文 献

References

- [1] 王锦昌. 大牛地气田下套管作业中环空波动压力分析[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(1): 36-41.
WANG Jinchang. Analysis of annular fluctuation pressure pattern during casing running operation in Daniudi Gas Field[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(1): 36-41.
- [2] CRESPO F, AHMED R, SAASEN A. Surge and swab pressure predictions for Yield-Power-Law drilling fluids[J]. SPE Drilling & Completion, 2012, 27(4): 574-585.
- [3] BURKHARDT J A. Wellbore pressure surges produced by pipe movement[J]. Journal of Petroleum Technology, 1961, 13(6): 595-605.
- [4] FONTENOT J E, CLARK R K. An improved method for calculating swab and surge pressures and circulating pressures in a drilling well[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1974, 14(5): 451-462.
- [5] BOURGOYNE A T Jr, MILLHEIN K K, CHENEVERT M E, et al. Applied drilling engineering chapter 8 solutions[R]. SPE 31656, 1986.
- [6] RUBIANDINI R S. New formula of surge pressure for determining safe trip velocities[R]. SPE 64480, 2000.
- [7] 郭宇健, 李根生, 宋先知, 等. 基于赫巴流体的偏心环空波动压力数值模拟[J]. 石油机械, 2014, 42(3): 5-9.
GUO Yujian, LI Gensheng, SONG Xianzhi, et al. Herschel-Bulkley fluid based numerical simulation of eccentric annular fluctuating pressure[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(3): 5-9.
- [8] 孔祥伟, 林元华, 邱伊婕. 微流量控压钻井中节流阀动作对环空压力的影响[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(3): 22-26.
KONG Xiangwei, LIN Yuanhua, QIU Yijie. Effect of choke valve action on annular pressure with micro-flux control in MPD drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(3): 22-26.
- [9] 郭宇健, 李根生, 宋先知, 等. 基于四参数流变模式的钻井液稳态波动压力计算[J]. 钻采工艺, 2014, 37(5): 1-4.
GUO Yunjian, LI Gensheng, SONG Xianzhi, et al. Steady swab/surge pressure predictions based on four parameters rheological model of drilling fluids[J]. Drilling & Production Technology, 2014, 37(5): 1-4.
- [10] GJERSTAND K, TIME R W. Simplified explicit flow equations for Herschel-Bulkley fluids in Couette-Poiseuille flow: for real-time surge and swab modeling in drilling[R]. SPE 170246, 2015.
- [11] 樊洪海, 刘希圣. 赫谢尔-巴尔克莱液体直井稳态波动压力计算模式[J]. 石油钻探技术, 1994, 22(1): 51-54, 70.
FAN Honghai, LIU Xisheng. The calculation model of steady state surge pressure by Herschel-Bulkley fluids in vertical well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1994, 22(1): 51-54, 70.
- [12] 汪海阁, 刘希圣. 定向井同心环空中卡森流体稳态波动压力的研究[J]. 钻井液与完井液, 1994, 11(6): 35-40, 44.
WANG Haige, LIU Xisheng. Study on steady surge pressure of Casson fluid in concentric annulus of directional wells[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 1994, 11(6): 35-40, 44.
- [13] 汪海阁, 刘希圣. 带屈服值的假塑性流体同心环空稳态波动压力研究[J]. 应用数学和力学, 1996, 17(1): 15-22.
WANG Haige, LIU Xisheng. Study on steady surge pressure for yield-pseudo plastic fluid in a concentric annulus[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1996, 17(1): 15-22.
- [14] BERNT S A, COOPER I, MISKA S, et al. Advanced drilling and well technology[M]. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2009: 147.
- [15] HERZOG R O, WEISSENBERG K. Ueber die thermische mechanische und röntgenoptische analyse der quellung[J]. Kolloid-Zs, 1928, 46(4): 277-289.
- [16] 樊洪海, 彭齐, 滕学清, 等. 不同流变模式钻井流体圆管层流压耗的通用精确算法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(1): 70-74.
FAN Honghai, PENG Qi, TENG Xueqing, et al. A high precision method for calculating laminar pressure drop of drilling fluid in pipe flow with different rheological models[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2014, 38(1): 70-74.
- [17] 樊洪海. 实用钻井流体力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2014: 77-132.
FAN Honghai. Practical drilling fluids mechanics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014: 77-132.
- [18] BAILEY W J, PEDEN, J M. A generalized and consistent pressure drop and flow regime transition model for drilling hydraulics[R]. SPE Drilling & Completion, 2000, 15(1): 44-56.
- [19] REED T D, PILEHVARI A A. A new model for laminar, transitional and turbulent flow of drilling muds[R]. SPE 25456, 1993.