

文章编号:1673-5005(2009)01-0053-04

斜井岩屑运移临界环空流速力学模型

宋洵成¹, 管志川¹, 陈绍维²

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 胜利油田 滨南采油厂监测大队, 山东 滨州 256606)

摘要:岩屑在大斜度井眼中主要以翻滚形式向井口方向运移,在低斜度井眼中主要以悬浮形式被钻井液举升至地面。通过岩屑受力分析建立两种运移机理作用下的岩屑运移临界流速计算力学模型,并提出保持倾斜井眼清洁的临界环空返速计算方法。将模型计算结果与现有试验数据进行了对比验证,结果表明:临界环空流速随井斜角变化趋势的模型预测结果与试验结果吻合较好,但由于模型计算和试验中判断形成岩屑床的准则不同,环空临界流速的模型计算值较试验值偏低;对实例井的井筒清洗分析结果与现场作业情况一致,验证了该模型的可靠性。

关键词:斜井; 岩屑运移; 临界环空流速; 力学模型

中图分类号:TE 21 **文献标识码:**A

Mechanics model of critical annular velocity for cuttings transportation in deviated well

SONG Xun-cheng¹, GUAN Zhi-chuan¹, CHEN Shao-wei²

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;
2. Monitoring Department of Binnan Oil Production Plant, Shengli Oilfield, Binzhou 256606, China)

Abstract: For the wellbore with high inclination, cuttings are transported to wellhead by a rolling form, while in the wellbore with a low angle, cuttings are suspended in drilling fluid and transported to the surface by a lifting form. On the basis of dynamics analysis on cuttings under two mechanisms, two corresponding models of critical velocity were developed. Based on the two models, a calculation method was constructed for determining the critical annular velocity to maintain hole cleaning. The trend of critical annular velocity varying with inclination predicted by critical annular velocity model was validated by comparison with old experimental results, and a good accordance was obtained. However, the predicted value of critical annular velocity is slightly lower than the experimental ones because of two different criteria on cuttings bed development. Its field application indicates also a good agreement between prediction and actual situations, which validated the reliability of this model.

Key words: deviated well; cutting transportation; critical annular velocity; mechanics model

钻井作业过程中,如果岩屑不能从井眼中清除而保持井眼清洁,将不能持续钻进。直井钻井一般不存在岩屑运移问题,但是对于倾斜井眼,尤其是大位移井和水平井钻井,如果钻井液环空流速不合适,岩屑就会堆积在大斜度井段井眼低边,形成稳固岩屑床或者流动岩屑床,从而造成卡钻、大扭矩、高摩阻和固井质量差等问题。试验研究^[1-4]表明,钻井液在倾斜环空中的携岩能力受钻井液排量、井眼几何

形态、钻井液密度、钻井液流变性、机械钻速、岩屑密度、岩屑尺寸、钻柱转速、钻柱偏心率等因素的影响。在岩屑运移的理论研究方面,以液固两相流为基础的理论模型也在不断发展^[5-9]。鉴于岩屑在倾斜井眼中运动形式的复杂性,笔者从分析岩屑在斜井中的运移规律着手,通过不同岩屑运移形式下的岩屑受力分析,建立保持倾斜井眼清洁的临界环空流速计算模型,以解决倾斜井眼携岩问题。

收稿日期:2008-04-25

基金项目:中国海洋石油总公司科技攻关项目“北部湾渤西南油田群井壁稳定及其配套技术研究”部分成果

作者简介:宋洵成(1972-),男(汉族),河南睢县人,副教授,博士研究生,从事油气井工程方面的研究。

1 斜井岩屑运移规律

对于倾斜井眼,钻井液将岩屑从钻头处携带到地面的过程中,当岩屑经过最易形成岩屑床的敏感区域时,如果钻井液环空流速低于该工况下的临界环空流速,岩屑将从上返流束中脱离出来沉积到井眼低边,随着岩屑床厚度的增加,岩屑床附近的钻井液流速则不断变大,达到临界环空流速时,岩屑床厚度不再增大,达到平衡状态。因此,临界环空流速是特定条件下不形成岩屑床的最小环空流速。

试验观测到在不同井斜和钻井液流变性条件下,岩屑在倾斜井眼中呈现4种形态:

(1)固定岩屑床。在大斜度井段,岩屑主要靠翻滚作用运移,当钻井液环空流速低于临界值时,岩屑保持静止状态,形成固定岩屑床。

(2)流动岩屑床。当钻井液环空流速达到临界值时,岩屑翻滚运移,形成流动岩屑床。

(3)非均匀悬浮。在低井斜段,如果钻井液和钻柱旋转形成的举升力足以克服重力作用使岩屑脱离岩屑床,但还不足以使岩屑保持持续悬浮,则岩屑将在井眼中形成非均匀悬浮,井眼低边岩屑浓度高于井眼高边岩屑浓度。该运移状态常发生在低黏、高速、紊流条件下。

(4)均匀悬浮。当举升力足以克服重力在井眼轴线方向上的下沉作用时,岩屑在井眼中保持均匀悬浮状态。

岩屑运移规律分析表明,只要钻井液上返和钻柱旋转产生的正作用力能够使岩屑发生翻滚或举升脱离岩屑床中的任何一种运动,就可以将岩屑携带至地面,避免固定岩屑床的形成。

2 岩屑受力分析

岩屑在倾斜井眼内运移过程中将受到重力 F_g (考虑钻井液的浮力)、钻井液举升力 F_L 、钻柱旋转举升力 F_R 、拖曳力 F_D 、塑性力 F_p 、轴向压力梯度差产生的拉力 $F_{\Delta p}$ (图1)。图1中 y 轴平行于井眼轴线,向上为正, x 轴垂直于井眼轴线,正方向指向井眼高边。假设:岩屑为球体;环空流动为稳态流动;岩屑不干扰环空中流速的分布。

(1)重力 F_g 。

$$F_g = (\rho_c - \rho_f)g \frac{\pi d^3}{6} \quad (1)$$

式中, ρ_c 和 ρ_f 分别为岩屑和钻井液密度, kg/m^3 ; d 为岩屑颗粒直径, m ; g 为重力加速度, m/s^2 。

(2)举升力 F_L 。举升力 F_L 使岩屑离开井眼低边,由岩屑附近钻井液 y 向流速在 x 方向不均匀分布引起的压力梯度产生,其方向垂直于 y 向,指向流速高的一侧,即井眼轴线,表达式为

$$F_L = C_L \frac{\pi d^2}{8} \rho_f v_p^2 \quad (2)$$

C_L 的计算采用 El-Samni 和 Einstein (1949 年) 给出的公式

$$C_L = \max \left\{ 0.09, 5.82 \sqrt{\frac{\alpha_p}{Re_p}} \right\}, \quad (3)$$

其中

$$\alpha_p = \frac{d}{2v_p} \left| \frac{dv}{dx} \right|, \quad Re_p = \frac{\rho_f d v_p}{\mu_a}$$

式中, C_L 为钻井液轴向流速沿 x 方向不均匀分布引起的举升力系数; v_p 为岩屑中心处钻井液 y 方向流速, m/s ; μ_a 为岩屑颗粒处钻井液剪切速率下的钻井液表观黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

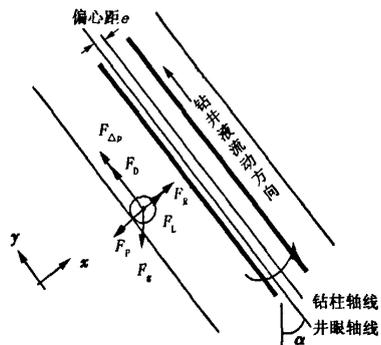


图1 倾斜井眼岩屑受力

Fig. 1 Forces on cuttings in deviated well

(3)举升力 F_R 。钻柱旋转时引起钻井液在垂直于井眼轴线平面 (R 平面) 内作圆周运动,产生流速 v_R , 井壁处 $v_R = 0$, 钻柱外侧 v_R 最大, v_R 在 x 方向不均匀分布引起的压力梯度产生举升力 F_R , 其方向垂直于 y 向,指向钻柱轴线。因此,

$$F_R = C_{L,R} \frac{\pi d^2}{8} \rho_f v_{p,R}^2 \quad (4)$$

式中, $C_{L,R}$ 为钻井液在 R 平面内流速沿 x 方向不均匀分布引起的举升力系数,计算方法同 C_L ; $v_{p,R}$ 为钻柱旋转引起的岩屑中心处 R 平面内钻井液圆周方向流速, m/s 。

(4)拖曳力 F_D 。拖曳力由钻井液黏度产生,沿 y 方向作用于岩屑,表达式为

$$F_D = C_D \frac{\pi d^2}{8} \rho_f v_p^2 \quad (5)$$

式中, C_D 为拖曳力系数,计算方法见文献[10]。

(5) 塑性力 F_p 。塑性力 F_p 由岩屑下方静止钻井液的屈服应力产生,垂直指向井眼低边,表达式为

$$F_p = \frac{\pi d^2 \tau_y}{2} \left[\alpha + \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \sin^2 \alpha - \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right]. \quad (6)$$

式中, τ_y 为钻井液屈服应力, Pa。

(6) $F_{\Delta p}$ 由 y 方向钻井液循环压力梯度产生:

$$F_{\Delta p} = \frac{\pi d^3}{6} G_{dp}. \quad (7)$$

式中, G_{dp} 为钻井液环空循环压力梯度, Pa/m。

3 临界环空流速

3.1 岩屑翻滚临界速度 v_R

在大斜度井段有岩屑床存在时,岩屑床表面的突出岩屑受力如图2所示。

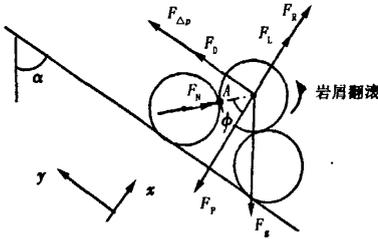


图2 岩屑翻滚运移机理

Fig.2 Transposition mechanism of cuttings rolling

岩屑向上翻滚时,突出岩屑受到岩屑床 y 方向下方岩屑的支撑作用 F_N ,对支撑点 A 取矩,有

$$(F_{\Delta p} + F_D) \frac{d}{2} \cos \phi + (F_L + F_R) \frac{d}{2} \sin \phi - F_g \frac{d}{2} \sin \left(\phi + \frac{\pi}{2} - \alpha \right) - F_p \frac{d}{2} \sin \phi = 0. \quad (8)$$

式中, ϕ 为支撑力 F_N 与 x 方向的夹角,可根据岩屑床孔隙度按照岩屑均匀排列计算。

将式(1)~(7)代入式(8),得岩屑翻滚临界速度 v_R 为

$$v_R = \left\{ \left[\frac{4}{3} (\rho_c - \rho_f) g d \sin \left(\phi + \frac{\pi}{2} - \alpha \right) + 4 \tau_y \left[\alpha + \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \sin^2 \alpha - \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right] \sin \phi - 8 F_R \sin \phi - \frac{4}{3} G_{dp} d \cos \phi \right] / \left[\rho_f (C_D \cos \phi + C_L \sin \phi) \right] \right\}^{1/2}. \quad (9)$$

3.2 岩屑举升临界速度 v_L

小斜度井段岩屑举升受举升作用脱离井眼低边时,突出岩屑对下方岩屑或井眼低边无压力,故将其受力简化成图3所示的形式。沿 x 方向合力为0,

得

$$F_L + F_R - F_g \sin \alpha - F_p = 0. \quad (10)$$

将式(1),(2),(4),(6)代入式(10),得岩屑举升临界速度 v_L 为

$$v_L = \left\{ [8 F_g \sin \alpha - 8 F_R + 4 \pi d^2 \tau_y (\alpha + (\pi/2 - \alpha) \sin^2 \alpha - \sin(2\alpha)/2)] / (\pi d^2 \rho_f) \right\}^{1/2}. \quad (11)$$

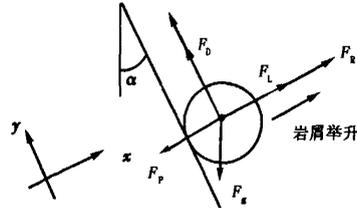


图3 岩屑举升运移机理

Fig.3 Transposition mechanism of cuttings lifting

3.3 临界环空流速计算方法

根据式(9)和式(11)计算得到的是环空中岩屑中心处的临界钻井液流速,而不是钻井液临界环空平均流速。环空临界流速计算步骤如下:

- (1) 对目标井段分别按照式(9)和(11)计算两种岩屑运移作用下的岩屑中心处临界流速 v_R 和 v_L 。
- (2) 取 v_R 和 v_L 最小值作为该井段岩屑中心处的临界流速 v_{R0} 。
- (3) 试取一平均环空流速 v_A 。
- (4) 根据文献[11]中的方法计算此时钻井液环空流速分布,继而计算岩屑中心处的钻井液流速 v_p 。
- (5) 若 $v_{R0} = v_p$,则此 v_A 就是目标井段的临界环空流速 v_{CA} ,否则相应调整 v_A ,重复步骤(4),(5)。

4 模型验证

为验证环空临界流速计算模型的可靠性,将其计算结果与3组试验结果进行了对比:(1) Peden^[1]的大间隙环空岩屑运移试验;(2) Peden^[1]的小间隙环空岩屑运移试验;(3) Larsen^[5]试验。对比结果见图4。图4表明:当井斜角从30°增加到90°时 v_{CA} 逐渐增加,且当井斜角小于50°时, v_{CA} 随井斜角增加的幅度远大于井斜角超过50°后 v_{CA} 随井斜角的增加幅度,在 v_{CA} 变化趋势预测方面模型与试验结果一致;在数值方面,模型预测值与试验结果吻合程度较高,但总体偏低。分析原因在于:试验中记录的临界环空流速以人为视觉观测流动环路中岩屑被完全携带出去为原则,而模型是以岩屑可以滚动或举升为原则,故模型要求的环空流速较试验观测值低。

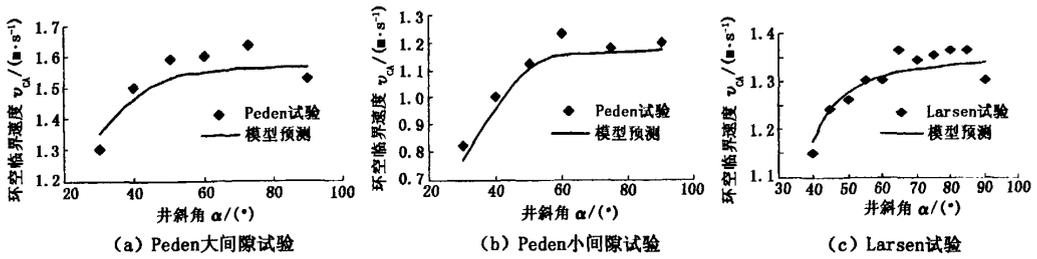


图4 临界环空流速模型计算值与试验结果对比

Fig.4 Comparison of computing results and experimental results of critical annular velocity

5 现场应用

南海北部湾海域某生产井钻进到 3.124 km 时的现场实钻数据为:排量 0.032 5 m³/s;岩屑密度 2 000 kg/m³;岩屑粒径 6.35 mm;机械钻速 22.22 m/h;钻井液密度 1 320 kg/m³;流变仪转速读数 $\Phi_{600} = 74$, $\Phi_{300} = 42$, $\Phi_3 = 3$;钻头直径 215.9 mm;钻杆外径 127 mm。

利用临界环空流速计算程序对上述条件下的井眼清洗状况进行了分析,不同井深处井眼清洗所需临界排量计算结果见图 5。该井临界环空流速计算模型预测结果表明,井筒各井深处的临界排量都小于实际作业排量,因此 0.032 5 m³/s 的排量不会产生岩屑堆积问题。这一结论与该井作业过程中未出现井筒清洗异常一致,也表明该临界环空流速计算模型可以用于分析和指导现场作业。

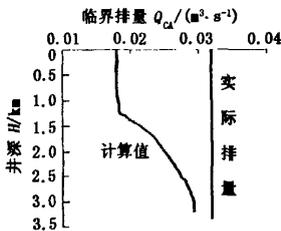


图5 生产井井眼清洗分析

Fig.5 Analysis of hole cleaning of production well

6 结论

(1)模型预测与试验结果的临界环空流速随井斜角变化趋势一致,预测值总体比试验值低。

(2)临界环空流速计算模型对实例井的井筒清洗分析结果与现场作业情况一致,验证了该模型的准确性和可靠性。

参考文献:

[1] PEDEN J M. Comprehensive experimental investigation of

drilled cuttings transport in inclined wells including the effects of rotation and eccentricity[R]. SPE 20925, 1990.

[2] JEFF Li, SCOTT Walker. Sensitivity analysis of hole cleaning parameters in directional wells[R]. SPE 74710, 2001.

[3] ZHOU L. Experimental study and modeling of cuttings transport with aerated mud in horizontal wellbore at simulated downhole conditions[R]. SPE 90038, 2004.

[4] 汪海阁,刘希圣,李洪乾,等. 水平井段钻井液携带岩屑的实验研究[J]. 石油学报,1995,16(4):125-131.

WANG Hai-ge, LIU Xi-sheng, LI Hong-qian, et al. An experimental study of transport of drilling cutting in a horizontal well [J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(4):125-131.

[5] LARSEN T I, PIL Ehvari A A, AZAR J J. Development of a new cuttings transport model for high-angle wellbores including horizontal wells [R]. SPE/IADC 25872,1993.

[6] NGU Yen D, RAHMAN S S. A three-layer hydraulic program for effective cuttings transport and hole cleaning in highly deviated and horizontal wells [R]. SPE/IADC 36383, 1996.

[7] HYUN Cho, SHAH Subhash N, OSISANYA Samuel O. A three-layer modeling for cuttings transport with coiled tubing horizontal drilling[R]. SPE/IADC 63269, 2000.

[8] 汪志明,张政. 水平井两层稳定岩屑传输规律研究[J]. 石油大学学报:自然科学版,2004,28(4):63-66.

WANG Zhi-ming, ZHANG Zheng. A model for two-layer cutting transport in horizontal wells[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28 (4):63-66.

[9] 龙芝辉,汪志明,郭晓乐. 斜直井段和水平井段中环空岩屑运移机理的研究[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2005,29(5):42-45,49.

LONG Zhi-hui, WANG Zhi-ming, GUO Xiao-le. Transport mechanism of cuttings in annulus during deviated and horizontal drilling[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005,29 (5):42-45, 49.

(下转第 63 页)

- Completion Fluid, 1998, 15(2):11-13.
- [6] 朱法银. 保护油气层常用术语[M]. 东营:石油大学出版社, 1996:54-56.
- [7] SHU Yong, YAN Jie-nian. New fluids prevent formation damage to Tarim sandstones [J]. Oil & Gas Journal, 2008, 106(19):45-49.
- [8] BENNION D B, THOMAS F B, BIETZ R F, et al. Remediation of atr and hydrocarbon phase trapping problems in low permeability gas reservoirs[J]. JCPT, 1999, 38(8):39-48.
- [9] 张金波, 鄢捷年. 钻井液中暂堵剂颗粒尺寸分布优选的新理论和新方法[J]. 石油学报, 2004, 25(6):88-91.
ZHANG Jin-bo, YAN Jie-nian. New theory and method for optimizing the particle size distribution of bridging agents in drilling fluids [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(6):88-91.
- [10] 王利国, 鄢捷年, 冯文强. 理想充填暂堵型钻井完井液的设计及室内评价[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2007, 31(3):72-76.
WANG Li-guo, YAN Jie-nian, FENG Wen-qiang. Design and lab evaluation of ideal packing bridging drilling and completion fluids[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, 31(3):72-76.
- [11] 蒲晓林, 雷刚, 罗兴树, 等. 钻井液隔离膜理论与成膜钻井液研究[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(6):1-4.
PU Xiao-lin, LEI Gang, LUO Xing-shu, et al. Study on membrane theory and film-forming drilling fluid [J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 2005, 22(6):1-4.
- [12] 艾贵成. 封堵成膜钻井液技术在昆2井的应用[J]. 石油钻采工艺, 2007, 29(1):89-91.
AI Gui-cheng. Application of plugging and film forming drilling fluid technology in Kun-2 well [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007, 29(1):89-91.
- [13] 张金山, 王卫国, 张振友, 等. 水基成膜钻井液在神北6井应用[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(6):39-41.
ZHANG Jin-shan, WANG Wei-guo, ZHANG Zhen-you, et al. Application of filming water base mud in well Shenbei-6 [J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 2006, 23(6):39-41.

(编辑 李志芬)

(上接第36页)

- [10] TENG Y C, ANDERSON R N, BOULANGER A, et al. 4-D seismic, the fourth dimension in reservoir management, part-6: 4-D seismic reservoir simulation [J]. World Oil, 1997, 218(10):113-121.
- [11] WANG Z. Feasibility of TL seismic reservoir monitoring [J]. The Leading Edge, 1997, 16(9):1327-1329.
- [12] HAN D, BATZLE M. Gassmann's equation and fluid-saturation effects on seismic velocities [J]. Geophysics, 2004, 69(2):398-405.
- [13] 云美厚, 张国才, 付雷, 等. 重复性噪声对实施4D地震监测的影响[J]. 勘探地球物理进展, 2003, 26(1):13-18.
YUN Mei-hou, ZHANG Guo-cai, FU Lei, et al. Effects of repeatability noises on 4-D seismic monitoring [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2003, 26(1):13-18.
- [14] 金龙, 陈小宏. 时移地震非一致性影响研究与互均衡效果验证[J]. 勘探地球物理进展, 2003, 26(1):45-48.
JIN Long, CHEN Xiao-hong. Effects of time-lapse seismic non-repeatability and verification of cross-equalization processing [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2003, 26(1):45-48.
- [15] JENKINS S D, WAITE M W, BEE M F. Time-lapse monitoring of the Duri steamflood: a pilot and case study [J]. The Leading Edge, 1997, 16(9):1267-1274.
- [16] 陈小宏. 四维地震归一化方法及实例处理[J]. 石油学报, 1999, 20(6):22-26.
CHEN Xiao-hong. Normalization for four-dimensional seismic data and its application to real data [J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(6):22-26.

(编辑 徐会永)

(上接第56页)

- [10] FORD J T. The development of mathematical models with describe cuttings transport in inclined boreholes [R]. CADE/CAODC 93-1102, 1993.
- [11] 刘希圣, 崔海清. 幂律流体在倾斜旋转内管的偏心环空中层流流动近似解法[J]. 石油大学学报:自然科学版, 1992, 16(6):29-33.
LIU Xi-sheng, CUI Hai-qing. An approximate solution to laminar flow in eccentric annulus of power law fluid [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1992, 16(6):29-33.

(编辑 李志芬)