

井下圆球运动分析与新型试压体设计

王乐顶¹, 王怀婧², 陈新海³, 槐巧双¹, 李晓勇¹

(1. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司井下技术服务分公司, 天津 300283;
2. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司工程技术研究院, 天津 300283;
3. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司工程技术研究院, 河北 任丘 062552)

摘要:在油、气、水井井下作业中,圆球广泛地应用于管柱试压、坐封和分段(层)压裂等施工作业。为准确计算现场施工时圆球到达设计点时间(即候球时间),通过对圆球运动过程和受力分析得出新的候球时间计算公式,并指出圆球绕流阻力系数、圆球直径、圆球密度和压井液性能等是影响候球时间的关键因素,为优化施工设计提供了依据;同时提出了一种能减少候球和反洗球时间的新型管柱试压体设计构思,为进一步优化施工作业奠定了基础。

关键词:井下作业;圆球;候球时间;新型管柱试压体

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)05-0044-04

Analysis of ball movement and design of new pressure test body in downhole

WANG Leding¹, WANG Huaijing², CHEN Xinhai³, HUAI Qiaoshuang¹, LI Xiaoyong¹

(1. Downhole Technology Service Branch, CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Tianjin 300283, China;
2. Engineering Technology Research Institute, CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Tianjin 300283, China;
3. Engineering Technology Research Institute, CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Renqiu Hebei 062552, China)

Abstract: In the downhole operation of oil, gas and water wells, the ball is widely used for pipe pressure testing, sealing and multi-stage (layer) fracturing. In order to accurately calculate the time when the ball arrives at the design point (i. e., the waiting time), the new formula of the waiting time calculation is developed by analyzing the movement process and the forces of the ball. It is pointed out the key factors affecting the waiting time include the coefficient of resistance around the ball, the ball diameter and density, and fracturing fluid properties, which provides a basis for optimizing the construction design. At the same time, a new type of tubular pressure test body that can reduce the waiting time and backwashing time is proposed, laying the foundation for further construction optimization.

Key words: downhole operations; ball; waiting time; new pressure test body

0 引言

在油、气、水井井下作业中涉及圆球的应用较多,如试油(气)作业中管柱的投球试压与反洗球、压裂作业中的投球坐封和打开滑套以及分段(层)压裂时的堵塞球等。然而在现场施工中存在以下两个问题:(1)圆球何时到达设计点?现场试压、坐封、打开滑套圆球入座和压裂堵塞球到达目的层位时的时间主要凭借经验来判断,缺少理论依据。(2)管柱试压反洗球耗时长。在一些无法使用可砸泄试压工具的

管柱试压中,利用投球试压、反洗球较多,然而在反洗球施工时耗时往往较长。以施工井 Z1 井(直井,井深 3650 m)为例,在 2 台 700 型水泥泵车排量 800 L/min 的条件下,洗球耗时 150 min,在消耗成本的同时也将施工周期拖长。

因此,针对以上问题,有必要对圆球在管内的运动规律进行分析,以期解决圆球到达设计点时间(即候球时间)的准确预判和提高反洗球时效的问题,从而提高井下作业时效降低施工成本。

收稿日期:2018-07-02; **修回日期:**2019-03-07 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2019.05.008

作者简介:王乐顶,男,汉族,1986 年生,工程师,石油与天然气工程专业,硕士,从事井下完井与增产作业施工与研究,天津市滨海新区大港油田渤海钻探井下技服, wangding1899@163.com。

引用格式:王乐顶,王怀婧,陈新海,等.井下圆球运动分析与新型试压体设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(5):44-47.

WANG Leding, WANG Huaijing, CHEN Xinhai, et al. Analysis of ball movement and design of new pressure test body in downhole [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(5): 44-47.

1 国内外研究进展

国内,2007年西南石油大学的杨文领等^[1]提出筛管悬挂器投球下落速度计算方法并通过实例进行验证,确定使用牛顿-雷廷格公式计算最为准确;2011年西南石油大学的肖晖等^[2]教授对投球压裂堵塞球运动方程进行研究,分析了堵塞球密度、施工排量 and 液体粘度等参数对堵塞球运动状态,特别是堵塞球最终运动速度(即沉降末速)的影响。2016年川庆钻探的温杰文等^[3]通过对直井段和斜井段自由沉降的钢球进行受力分析建立速度计算模型,得出投球式封隔器实践中候球时间的量化计算方法。该方法通过简化将圆球的沉降末速作为平均速度来计算,忽略了圆球加速运动阶段。

国外,2004年希腊克里特理工大学的 Kelessidis^[4]教授通过现场数据研究了圆球在牛顿和非牛顿流体时的沉降末速并分析了其影响因素。2012年伊朗沙尔鲁德理工大学的 Rooki 等^[5]利用人工神经网络来预测圆球在牛顿流体和幂律流体下的沉降末速。2017年丹麦技术大学的 Vertchenko^[6]研究了在低雷诺数下利用斯托克法计算不同直径圆球的沉降速度并进行分析。

通过以上文献调研分析,沉降末速作为研究圆球运动规律的重要参数,针对圆球沉降末速的计算主要有以下方法。

(1) 斯托克(Stokes)算法:

$$v_t = \frac{gd_b^2(\rho_b - \rho_f)}{18\eta} \times 10^6 \quad (1)$$

式中: v_t ——圆球沉降末速度, m/s; g ——重力加速度, 9.81 m/s^2 ; d_b ——圆球直径, m; ρ_b ——圆球密度, g/cm^3 ; ρ_f ——压井液密度, g/cm^3 ; η ——压井液粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

式(1)的使用条件是球形颗粒在牛顿流体中沉降,且颗粒的雷诺数 $Re < 1$,即慢速沉降。

(2) 牛顿-雷廷格算法:

$$v_t = \left[\frac{8gd_b(\rho_b - \rho_f)}{3\rho_f} \right]^{1/2} \quad (2)$$

式(2)适用范围为雷诺数 Re 在 $10^3 \sim 10^5$ 之间。

(3) 水力学算法:

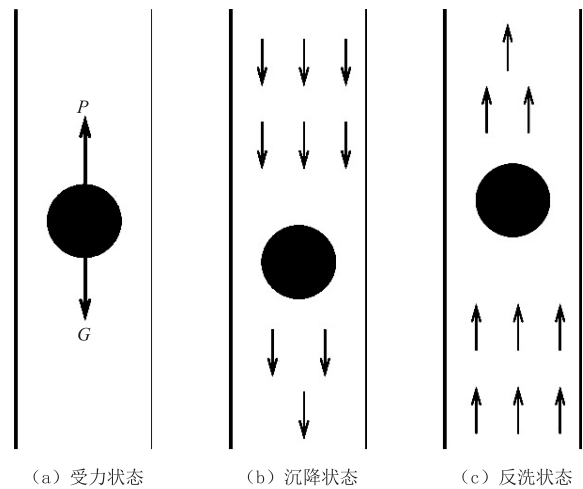
$$v_t = \left[\frac{4gd_b(\rho_b - \rho_f)}{3C_D\rho_f} \right]^{1/2} \quad (3)$$

式(3)适用的范围:当雷诺数 $Re < 1$ 时,绕流阻力系数 $C_D = 24/Re$,此时符合斯托克定律,即为斯

托克算法;当雷诺数 Re 在 $10^3 \sim 10^5$ 之间时圆球绕流阻力系数 C_D 可取 $0.44 \sim 0.50$,具体可通过查附录图和公式确定。通过观察可知,当绕流阻力系数 C_D 取 0.50 时,即为牛顿-雷廷格算法。因此,斯托克算法和牛顿-雷廷格算法为水力学算法的特殊情况。

2 圆球运动分析及候球时间计算

圆球在管内的运动状态一般分为 3 种情况:圆球自由沉降入座;泵送圆球沉降入座;反洗试压球,如图 1 所示。



(a) 受力状态 (b) 沉降状态 (c) 反洗状态

图 1 圆球受力分析及不同工况的运动状态

Fig.1 Force analysis of the ball and its movement under different working conditions

通过借鉴国内外文献^[7-16]中对圆球的研究,对圆球在井下的运动规律进行分析,同时,将研究结论与现场应用相结合,来对施工作业做出优化。根据文献^[9],在两相流动中,Basset 力是由于相对速度随时间的变化而导致颗粒表面附面层发展滞后所产生的非恒定气动力。对于尺寸较大的颗粒,忽略 Basset 力不会造成较大的计算误差,因此对圆球受力分析时选择忽略 Basset 力。

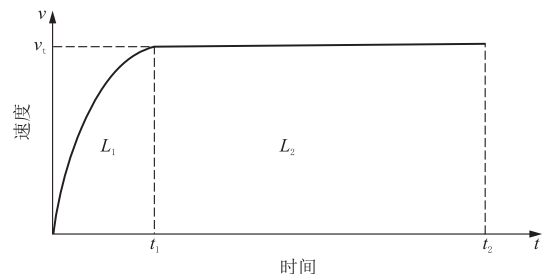


图 2 不同时间下圆球速度的变化规律

Fig.2 Ball velocity changes at different times

根据受力分析可知,圆球在井下的运动分为两个阶段:一是加速运动阶段 L_1 ,随着圆球速度的增加,阻力越来越大,加速度越来越小;二是匀速运动阶段 L_2 ,当速度增加到一定程度,阻力、浮力与重力平衡时,加速度为0,圆球以匀速运动,此时的速度即为沉降末速度 v_t 。

重力: $G = mg = 1/6\pi d_b^3 \rho_b g$;浮力: $P = 1/6\pi d_b^3 \rho_f g$;阻力: $D = 1/8\pi C_D \rho_f d_b^2 v_t^2$ 。

因为:

$$a = \frac{\Delta F}{m} = \frac{G - P - D}{m} = \frac{dv}{dt}$$

则有:

$$t_1 = \frac{2d_b \rho_b \ln(2v_t)}{3C_D \rho_f v_t}$$

又根据运动过程边界条件:

$$v_t = at_1; L_1 = \frac{v_t^2}{2a}; t_2 = \frac{H - L_1}{v_t}$$

圆球到达设计点时间为:

$$t = t_1 + t_2 = \frac{H}{v_t} + \frac{d_b \rho_b \ln(2v_t)}{3C_D \rho_f v_t} \quad (4)$$

式中: H ——投球到达设计点的垂深, m; v_t ——试压球沉降末速度, m/s; g ——重力加速度, 9.81 m/s²; d_b ——圆球直径, m; ρ_b ——圆球密度, g/cm³; ρ_f ——压井液密度, g/cm³; η ——压井液粘度, mPa·s; C_D ——绕流阻力系数, 无因次。







通过对新的候球时间计算公式分析可知:圆球候球时间主要与设计点的垂深 H 和圆球沉降末速度 v_t 有关。对沉降末速度的计算公式即式(3)进行分析得:影响沉降末速的主要因素为绕流阻力系数 C_D 、圆球直径 d_b 、圆球密度 ρ_b 和压井液性能(密度和粘度)。在以上影响因素中,绕流阻力系数在已知三维物体的形状与尺寸条件下主要取决于温度及在该温度下流体的密度、粘度与运动状态。压井液性能是相对而言容易调整的。可以通过改变三维物体的形状与尺寸来降低绕流阻力,从而缩短“候球时间”和反洗施工时间,优化施工设计和提高施工效率。

3 新型管柱试压体设计构思

根据空气动力学定义将物体形状分为流线型和非流线型两种。流线型即不出现边界层分离的形状,相对于流线型,圆球则属于非流线型中的钝体。物体形状不同其绕流阻力系数差异也很大,具体见表1。

表1 常见三维物体绕流阻力系数 C_D 对比($Re > 10^4$)

Table 1 Comparison of drag coefficient C_D of common 3D objects ($Re > 10^4$)

物体形状	绕流阻力系数	物体形状	绕流阻力系数
→ 	0.85	→ 	0.44~0.50
→ 	0.40	→ 	0.05
→ 	0.20	→ 	0.01

通过借鉴列车、船舶及水下航行体的流线型设计并参考仿生鳗科鱼类游动力学研究^[17-20]。在几种常用流线型体(卡克斯流线型、双半椭圆流线型、半椭圆+抛物线流线型和半椭圆+圆弧流线型)轮廓方程的基础上,得出半椭圆+圆弧流线型的阻力系数最小^[20]。该流线型的进流段是半椭圆,去流段是一段圆弧,具体曲线方程为:

$$\begin{cases} y = \pm [D_0 / (2L_E)] \sqrt{L_E^2 - x^2} \\ y = D_0 / 2 - [R - \sqrt{R^2 - x^2}] \end{cases} \quad (5)$$

式中: R ——圆弧半径, $R = (4L_R^2 + D_0^2) / (4D_0)$; L ——流线型总长, $L = L_E + L_R$; D_0 ——最大横剖面直径; L_E ——进流段长度; L_R ——去流段长度。

鉴于以上曲线方程并结合工程实际设计出一种新型管柱试压体,如图3所示。流线体具体参数为:最大横剖面直径60 mm,进流段长度40 mm,去流段长度120 mm,圆弧半径255 mm。

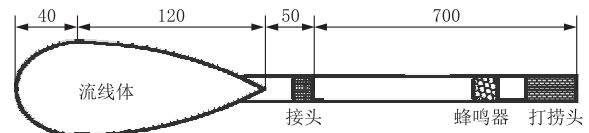


图3 新型管柱试压体示意图(以 $\varnothing 73$ mm N80 平式油管为例)

Fig.3 Schematic diagram of the new pressure test body

新型管柱试压体由流线体和打捞杆两部分组成。(1)流线体由流线减阻头和接头构成,减阻头属于半椭圆+圆弧流线型构造,通过减阻头能有效降低试压体入座和反洗时的绕流阻力,加快试压体入座和减小反洗难度,提高作业时效;接头的配备便于与打捞杆快速连接。(2)打捞杆的作用主要是在反洗时方便作业人员打捞试压体,而且利用声音在液体中传播较空气中快的原理,在打捞杆中部配备蜂鸣器,在使用试压体时打开电源开关使蜂鸣器处于工作状态。通过在井口监测声音的强弱来判断反洗时试压体的大致位置,便于施工人员打捞,新型管柱试压体的设计构思为进一步优化施工作业奠定了基础。

4 结论

(1)通过对圆球的运动阶段和受力分析得出新的候球时间计算公式,为优化施工设计提供了依据;

(2)圆球绕流阻力系数、圆球直径、圆球密度和压井液性能(密度和粘度)是影响候球时间的关键因素;

(3)设计提出了一种新型管柱试压体设计构思,与圆球试压体相比,该试压体应具有更小的绕流阻力;

(4)新的候球时间计算公式和新型管柱试压体设计构思,应通过现场应用进一步完善和改进。

参考文献 (References):

- [1] 杨文领,刘清友,何玉发,等.筛管悬挂器投球下落速度计算方法探讨[J].流体传动与控制,2007,(4):17-19.
YANG Wenling, LIU Qingyou, HE Yufa, et al. Discussions about the computational methods of tripping ball drop speed in liner hanger [J]. Fluid Power Transmission and Control, 2007, (4): 17-19.
- [2] 肖晖,李洁,曾俊.投球压裂堵塞球运动方程研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2011,33(5):162-167.
XIAO Hui, LI Jie, ZENG Jun. Ball motion equation in the ball sealer fracturing[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2011, 33(5): 162-167.
- [3] 温杰文,谢欣.投球式封隔器候球时间计算和球入座问题分析[J].钻采工艺,2016,39(3):43-45.
WEN Jiewen, XIE Xin. Ball waiting time calculation of the ball-thrown packer and problem analysis of the ball into the seat[J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(3): 43-45.
- [4] Kelessidis V C. An explicit equation for the terminal velocity of solid spheres falling in pseudoplastic liquids[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(21): 4437-4447.
- [5] Rooki R, Ardejani F D, Moradzadeh A, et al. Prediction of terminal velocity of solid spheres falling through Newtonian and non-Newtonian pseudoplastic power law fluid using artificial neural network[J]. International Journal of Mineral Processing, 2012:53-61.
- [6] Vertchenko L, Vertchenko L. Determinação da viscosidade por meio da velocidade terminal; uso da força de arrasto com termo quadrático na velocidade[J]. Revista Brasileira De Ensino De Fisica, 2017, 39(4).
- [7] 沈燕来,陈建武.冲砂洗井水力计算方法综述[J].水动力学研究与进展,1998,13(3):347-353.
SHEN Yanlai, CHEN Jianwu. Brief review on hydraulic calculation methods of sand flushing[J]. Journal of Hydrodynamics, 1998, 13(3): 347-353.
- [8] M. Nozaki, D. Zhu, A. D. Hill. Experimental and field data analyses of ball-sealer diversion[J]. SPE Production & Operations, 2013, 28(3): 286-295.
- [9] 由长福,祁海鹰,徐旭常. Basset 力研究进展与应用分析[J].应用力学学报,2002,19(2):31-33.
YOU Changfu, QI Haiying, XU Xuchang. Progresses and application of basset force[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2002, 19(2): 31-33.
- [10] 王子振,何英明,仲冠宇,等.流水中重物运动过程的数学建模与分析[J].数学的认识与实践,2011,41(14):138-145.
WANG Zizhen, HE Yingming, ZHONG Guanyu, et al. The modeling and analysis of the object's motion in flowing water[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2011, 41(14): 138-145.
- [11] 卢修峰,刘凤琴.投球分压的理论验证及实例分析[J].石油钻采工艺,1993,16(3):57-62.
LU Xiufeng, LIU Fengqin. The theory verification and examples analysis of steeling ball separate-layer fracturing[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1993, 16(3): 57-62.
- [12] 单定军,张劲松,代健.重物落水后运动过程的数学模型[J].武汉大学学报:工学版,2011,44(6):720-725.
SHAN Dingjun, ZHANG Jinsong, DAI Jian. Mathematical model of weight's movement process after fell into water[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(6): 720-725.
- [13] 任安禄,李广望,邹建峰.中等雷诺数圆球绕流的数值研究[J].浙江大学学报:工学版,2004,38(5):644-648.
REN Anlu, LI Guangwang, ZOU Jianfeng. Numerical study of uniform flow over sphere at intermediate Reynolds Numbers[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, 38(5): 644-648.
- [14] 禹华谦.工程流体力学(水力学)[M].四川成都:西南交通大学出版社,2013,99-136.
YU Huaqian. Engineering fluid mechanics (Hydraulics)[M]. Chengdu Sichuan: Southwest Jiaotong University Press, 2013, 99-136.
- [15] 魏辽,马兰荣,朱敏涛,等.大通径桥塞压裂用可溶解球研制及性能评价[J].石油钻探技术,2016,44(1):90-94.
WEI Liao, MA Lanrong, ZHU Mintao, et al. Development and performance evaluation of dissolvable balls for large borehole bridge plug fracturing [J]. Petroleum Drilling Technologies, 2016, 44(1): 90-94.
- [16] 王兴文,杨建英,任山,等.堵塞球选择性分层压裂排量控制技术研究[J].钻采工艺,2007,30(1):75-76,86.
WANG Xingwen, YANG Jianying, REN Shan, et al. Study on displacement control technique for ball-off separate layer fracturing[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(1): 75-76, 86.
- [17] 盛振邦,刘应中.船舶原理[M].上海:上海交通大学出版社,2004.
SHENG Zhenbang, LIU Yingzhong. Ship principle[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2004.
- [18] 田红旗,周丹,许平.列车空气动力学性能与流线型头部外形[J].中国铁道科学,2006,27(3):47-55.
TIAN Hongqi, ZHOU Dan, XU Ping. Aerodynamic performance and streamlined head shape of train[J]. China Railway Science, 2006, 27(3): 47-55.
- [19] 李林.鲮科鱼类游动力学特性的理论与仿真研究[D].黑龙江哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
LI Lin. The theory and simulink research of thunniform fish's swimming mechanic[D]. Harbin Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [20] 肖华攀,方子帆,朱陈,等.水下流线型体的结构阻力特性及其应用研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2013,35(6):92-96.
XIAO Huapan, FANG Zifan, ZHU Chen, et al. Structural drag characteristic and application research of underwater streamlined body[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2013, 35(6): 92-96.