

岩屑床清除工具螺旋槽道优化设计

李斐^{1,2} 魏来³ 郝英状^{1,2} 刘禹铭³ 郝宙正³ 路飞飞^{1,2} 邹书强^{1,2}

1. 中国石化西北油田分公司石油工程技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011;

2. 中国石化缝洞型油藏提高采收率重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;

3. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452

摘要:为提高水力机械井眼净化装置的效率,通过数值仿真计算方法,基于计算流体动力学理论建立不同类型岩屑床清除工具的数值计算模型,研究了螺旋槽道形状以及螺旋叶片结构参数对岩屑床清除工具作用效果的影响规律。研究表明:双段螺旋型槽道形状的岩屑床清除工具性能较优,适当增大第二段螺旋槽道的长度同时减小螺旋叶片的螺距可以提升其性能。通过逐步优化设计及优选相关结构参数实现提高岩屑床清除工具性能的目的,为岩屑床清除工具的优化设计提供了一定的理论依据。

关键词:岩屑床清除工具;螺旋槽道;数值模拟;优化设计

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2020.03.010

Optimization of Spiral Channel Design of Cleaning Tools for Cuttings Bed

Li Fei^{1,2}, Wei Lai³, Hao Yingzhuang^{1,2}, Liu Yuming³, Hao Zhouzheng³, Lu Feifei^{1,2}, Zou Shuqiang^{1,2}

1. Institute of Engineering Technology of Sinopec Northwest Oil Field Branch, Urumqi, Xinjiang, 830011, China;

2. The Sinopec Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery for Fractured and Cavern Reservoirs, Urumqi, Xinjiang, 830011, China

3. CNOOC Ener Tech-Drilling & Production, Tianjin, 300452, China

Abstract: To improve the efficiency of hydraulic equipment for wellbore cleaning, a numerical simulation calculation model for different types of cleaning tools for cuttings bed is set up based on computational fluid dynamics theory. This model is used to study the influence of parameters such as spiral channel shape and spiral blades structure on the effectiveness of the cleaning tool for cuttings bed. The results show that the cleaning tool for cuttings bed with a double-segment spiral channel has better performance. Increasing the length of the second segment of the spiral channel while reducing the pitch of the spiral blades in an appropriate manner can improve the performance. This study provides theoretical basis for optimising performance of cuttings bed cleaning tool, via step by step approach in optimization of the design and optimum choice of relevant structural parameters.

Keywords: Cleaning tool for cuttings bed; Spiral channel; Numerical simulation; Optimization of the design

收稿日期:2019-12-28

基金项目:国家科技重大专项“缝洞型油藏提高采收率配套工艺技术示范”(2016 ZX 05053-004-001);国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2017 ZX 05005-005);2018年中石化科技部项目“顺北油气田一区优快钻井技术研究”(P18021)

作者简介:李斐(1986-),女,陕西渭南人,助理研究员,硕士,主要从事井下工具研究及科研技术管理工作。E-mail: Lifeiupc@163.com

0 前言

因岩屑携带困难,不断沉积形成的岩屑床是大斜度、大位移定向井和水平井钻井施工过程中普遍存在的问题,岩屑床造成的憋泵、憋钻等复杂情况会严重影响钻井安全和钻进效果,可能带来较大的经济损失^[1-6],必须及时、有效地清除岩屑床。传统岩屑清除方法主要有:提高钻杆转速、环空钻井液流动速度和改善钻井液性能及机械清除等^[7-13]。但是,受钻井工具的限制,提高钻杆转速可能会造成钻具失效;提高环空钻井液流动速度不仅受到钻井泵功率限制,还会造成对井壁的过度冲刷;改善钻井液性能需要较高费用,且对岩屑床清除效果的提升很有限;机械清除会加大起下钻工作量,降低工作效率。

目前,国内外学者提出在钻杆上增设螺旋槽道结构的新型水力机械井眼净化装置^[14-17],槽道结构对钻井液具有搅动作用,可提高岩屑携带能力。陈锋等人^[18]通过在钻杆外表面布置特殊的螺旋槽道结构,研发了一种高效岩屑床清除工具,并通过数值仿真揭示了此种结构钻杆实现岩屑清除的工作原理。余万顺等人^[19-20]以三种不同螺旋槽道叶片形状(螺旋形叶片、V形叶片、直棱形叶片)的岩屑床清除工具为研究对象,研究了不同的叶片形状对岩屑床清除工具作用效果的影响规律。结果表明:三种螺旋槽道叶片形状均能有效地提高岩屑床的清除效果,但它们的流场特征却不同,在岩屑床清除效果方面,螺旋形和V形岩屑床清除工具强于直棱形。该作者通过设计不同结构参数的螺旋形岩屑床清除工具,进一步研究了叶片长度、高度和叶片数对岩屑床清除工具作用效果的影响规律。

对岩屑床清除工具的研究仍处于起步阶段,针对螺

旋叶片相关结构参数(螺旋槽道长度、螺旋叶片螺距等)的研究较少。本文采用流体动力学的方法,进一步研究了岩屑床清除工具螺旋槽道相关结构参数对其清除性能的影响和规律。

1 数学模型

流体运动控制方程主要包括连续性方程、动量方程以及能量方程,其通用控制方程为^[21]:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{V}\phi) = \text{div}(\mathbf{\Gamma}\text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

式中: t 为时间变量,s; ρ 为密度, kg/m^3 ; ϕ 为通用变量,可以代表速度分量 u 、 v 、 w 等求解变量, m/s ; $\mathbf{V}$ 为速度矢量, m/s ; $\mathbf{\Gamma}$ 为广义扩散系数; S 为广义源项。式(1)各项分别对应于瞬态项、对流项、扩散项和源项。

Reynolds 平均法是目前使用最为广泛的湍流数值模拟方法,由于 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型对强旋流动计算相较于其他几种湍流模型有较高的精度,本文选用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型。

2 数值计算模型

2.1 几何模型

岩屑床清除器最为主要的特征之一就是它的螺旋槽道结构,它可以改变环空流场的流动特性,对沉积在井底的岩屑产生更有力的冲刷效果,合理的槽道结构设计可以在一定程度上把岩屑导向井眼上方。图1给出了岩屑床清除工具螺旋槽道的结构示意图, L_1 代表第一段螺旋槽道的长度, L_2 代表第二段螺旋槽道的长度, P 代表螺距。螺旋槽道的基本结构参数为:岩屑床清除工具的钻杆直径 89 mm,叶片数 5,螺旋槽道段最大外径 120 mm,旋转速度 60 r/min。此外,井眼直径 165 mm。

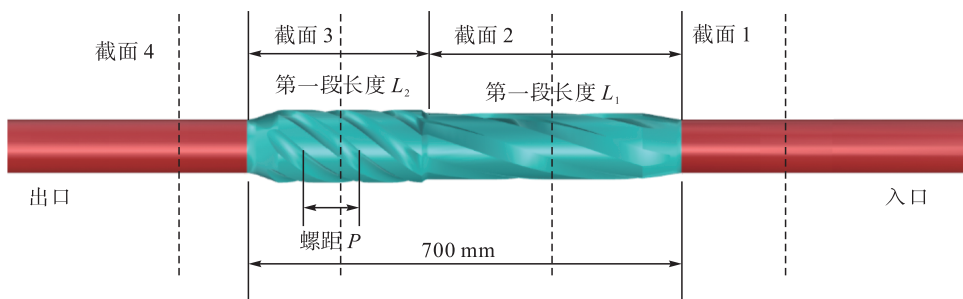


图 1 岩屑床清除工具模型图

Fig. 1 Cuttings bed remover tool model

2.2 计算区域及边界条件

岩屑床清除工具在高速旋转下会带动螺旋槽道中的流体一起旋转运动。因此,计算区域划分为旋转区域和静止区域,见图2。对于旋转区域的流动,采用多参考

系模型(MRF)进行模拟。旋转区域和静止区域的流场数据通过交界面进行数据交换。

边界条件设置如下:入口设为速度入口边界,大小为 0.972 m/s(对应的环空流量为 15 L/s,环空截面面积

为 $0.015\ 429\ \text{m}^2$); 出口设为压力出口, 表压为 $0\ \text{Pa}$; 井壁(外壁面)采用无滑移固定壁面条件; 钻杆外表面(内壁面)采用旋转壁面边界, 旋转速度为 $60\ \text{r/min}$ 。

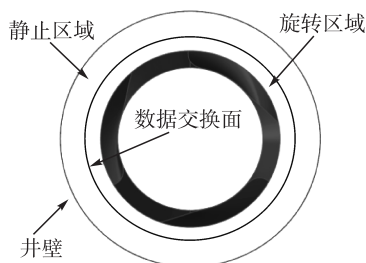
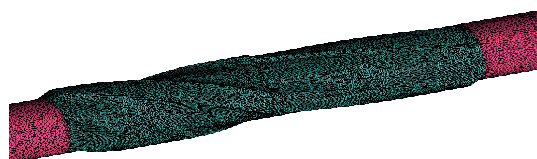


图2 计算区域图

Fig. 2 Computational domain

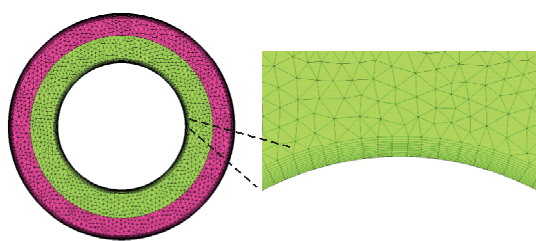
2.3 网格划分

网格划分采用四面体及六面体的混合网格类型, 表面网格最大尺寸 $4\ \text{mm}$, 最小尺寸 $0.5\ \text{mm}$ 。为了准确模拟随钻堵漏工具旋流喷嘴壁面附近的附面层流动, 划分了边界层, 其第一层高度为 $0.1\ \text{mm}$, 增长率为 1.1 , 共计 12 层, 网格数量为 $1\ 200$ 万, 见图3。



a) 表面网格

a) Surface mesh



b) 边界层网格

b) Boundary layer mesh

图3 网格划分图

Fig. 3 Mesh generation

3 计算结果

计算结果将从截面速度场、环空流场两个方面来阐述清除器周围的流场。首先, 对螺旋槽段的形状进行了设计以及比选, 之后研究了螺旋槽道段的长度比例以及螺距对岩屑清除器性能的影响。

3.1 螺旋槽道形状

图4给出了三种不同螺旋槽道形状的岩屑床清除工具的结构外形示意图, 分别记为A型-简单螺旋, B型-双段螺旋, C型-直楞型螺旋。

A型-简单螺旋

B型-双段螺旋

C型-直楞型螺旋



图4 不同岩屑床清除工具结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of different structures of cutting bed remover tool

图5给出了不同岩屑床清除工具不同横截面的速度分布情况, 截面位置见图1, 截面1位于入口端, 截面2位于第一段螺旋槽段区域内, 截面3位于第二段螺旋槽道范围内, 截面4位于出口端。由图5可知, 来流经过螺旋槽段后气流速度均得到不同程度的增大。

通过对比截面1可知, 在相同来流条件下, 三种岩屑床清除器入口端的流场分布一致, 表明了三种工况计算参数设置的一致性。在截面2, B型清除工具的截面流速比A、C型清除工具截面流速低。原因在于: A型结构的第一段螺旋叶片螺距与B型相比更小, 对气流的加速作用更强; 而C型结构的螺旋槽道形状的截面积较小且对流体阻碍作用小于B型, 使得截面的流速更大。对于截面3而言, B型清除工具的截面流速更大, 这是由于气流经过第一段螺旋槽道加速, 到达第二段螺旋槽道后气流通过的截面面积改变且受到第二段螺旋叶片的引导作用, 速度得到进一步的增大; 而A、C型结构由于第一段与第二段螺旋槽道结构相同, 截面2与截面3的流速分布一致。对比截面4可知, 由于气流通过面积增大, 气流速度会有一定程度的减小。由于B型结构在截面3处的流速更大, 因此在出口端截面4, B型清除工具的截面速度场分布更大。综上所述, B型-双段螺旋结构的岩屑床清除工具的性能优于A型-简单螺旋和C型-直楞型螺旋结构的岩屑床清除工具的性能。

3.2 螺旋槽道长度比例

针对性能较好的B型-双段螺旋结构, 进一步研究双段螺旋槽道长度比例对岩屑床清除工具性能的影响。为对比两段螺旋槽道长度比例对岩屑清除器性能的影响, 建立了四种不同长度比例的计算模型, 见图6。最关注的指标是截面速度场分布, 由于截面1与截面2速度场分布的对比性较弱, 图7仅给出了截面3与截面4的速度场对比结果。由图7可知, 在螺旋槽道总长不变的情况下, 增大第二段螺旋槽道的长度, 出口端截面4的速度有所增大, 当继续增大时, 出口端截面的速度变化很小。在第二段螺旋槽道长度对出口截面的影响较小的范围内, 考虑整体螺旋段旋转摩阻越小越好, 优选 $L_1/L_2 = 1.4$ 的工况。

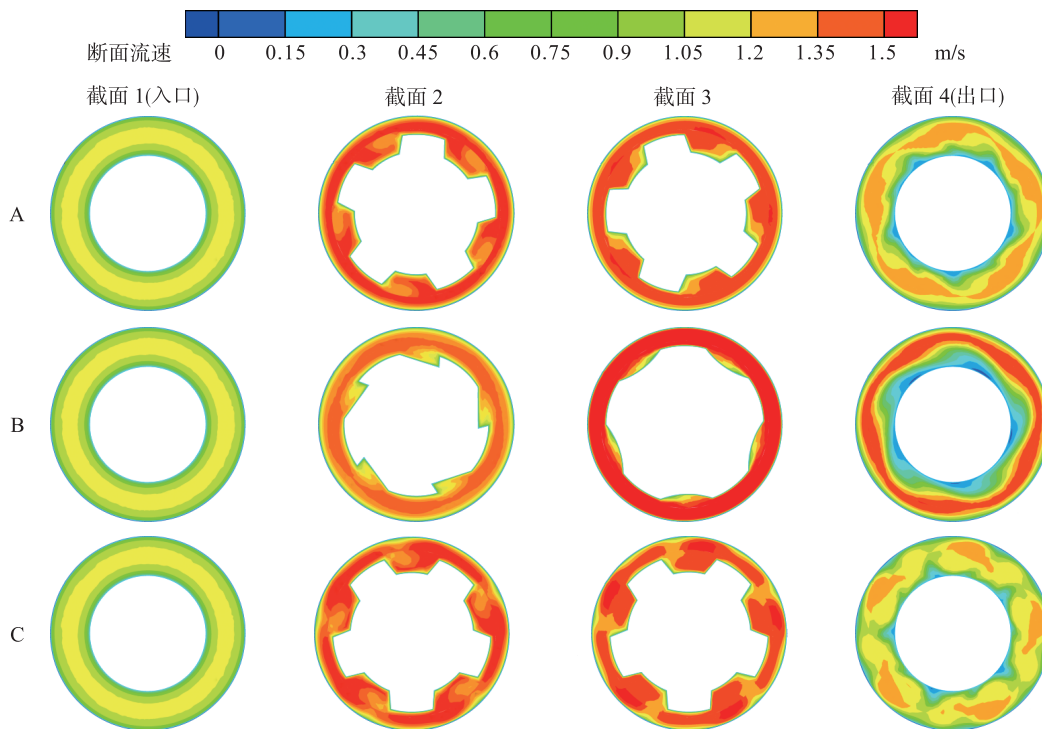


图 5 不同岩屑床清除工具的截面速度场分布图

Fig. 5 Cross section velocity field distribution of different cuttings bed remover tools

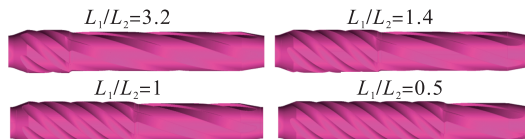


图 6 不同螺旋槽道长度比例模型图

Fig. 6 Different proportions of spiral channel length

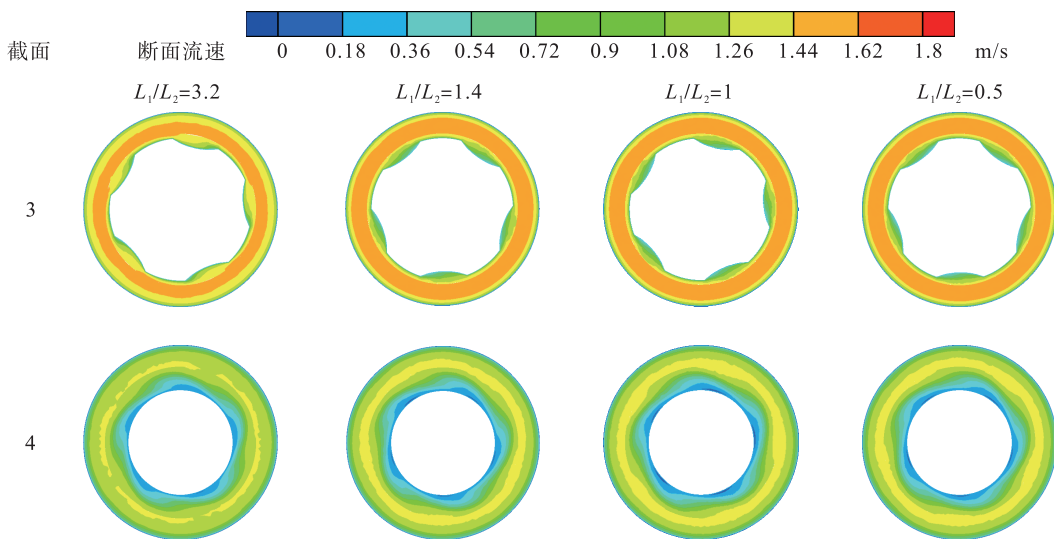


图 7 螺旋槽道长度比例对速度场的影响图

Fig. 7 Effect of spiral channel length ratio on velocity field

3.3 第一段螺旋槽道叶片螺距

下面研究螺旋槽段的叶片螺距对双段螺旋型清除工具性能的影响,设计了四种第一段螺旋叶片螺距不同的清

除工具进行对比分析,见图 8。图 9 给出了不同工况下,计算区域截面 2 与截面 4 的速度分布。由图 9 可知,第一段螺旋槽道的叶片螺距对岩屑床清除工具的性能影响较小。

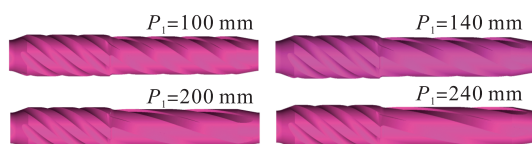


图8 第一段螺旋槽道不同叶片螺距的清除工具对比图
Fig. 8 Removers of different pitch of the first spiral channel

3.4 第二段螺旋槽道叶片螺距

图 10 给出了四种第二段叶片螺距不同的清除工具结构。其速度场分布见图 11。由图 11 可知,第二段螺旋槽道的螺旋型叶片螺距的影响大于第一段。在螺旋叶片数以及螺旋槽道长度不变的情况下,第二段螺旋槽道的叶片螺距越小,出口截面的速度更大,更有利于岩屑清除工具的岩屑清除。

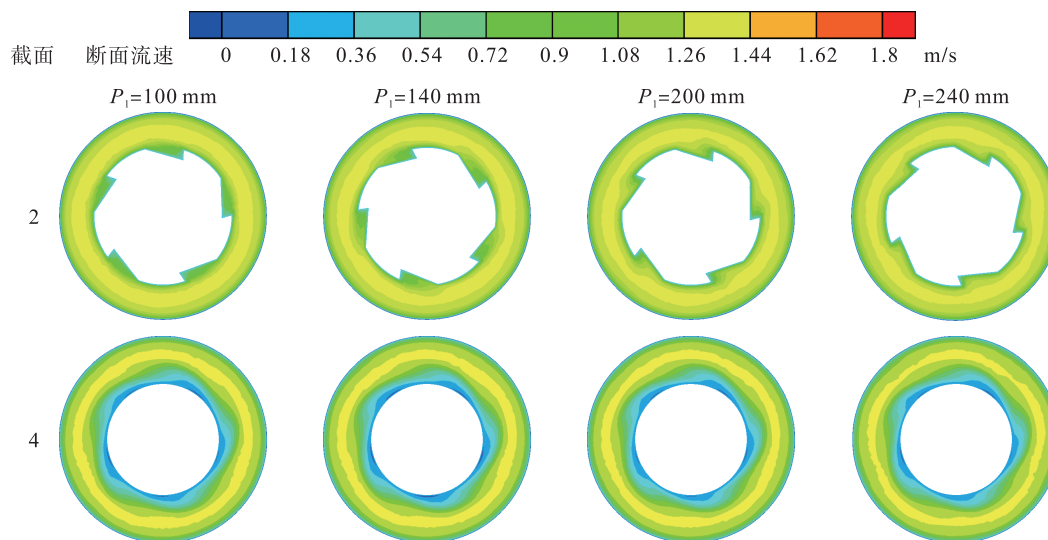


图9 第一段螺旋槽道叶片螺距对速度场的影响图
Fig. 9 Effect of different pitch of the first spiral channel on velocity field

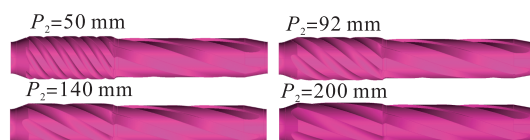


图10 第二段螺旋槽道不同叶片螺距的清除工具结构图
Fig. 10 Removers of different pitch of the second spiral channel

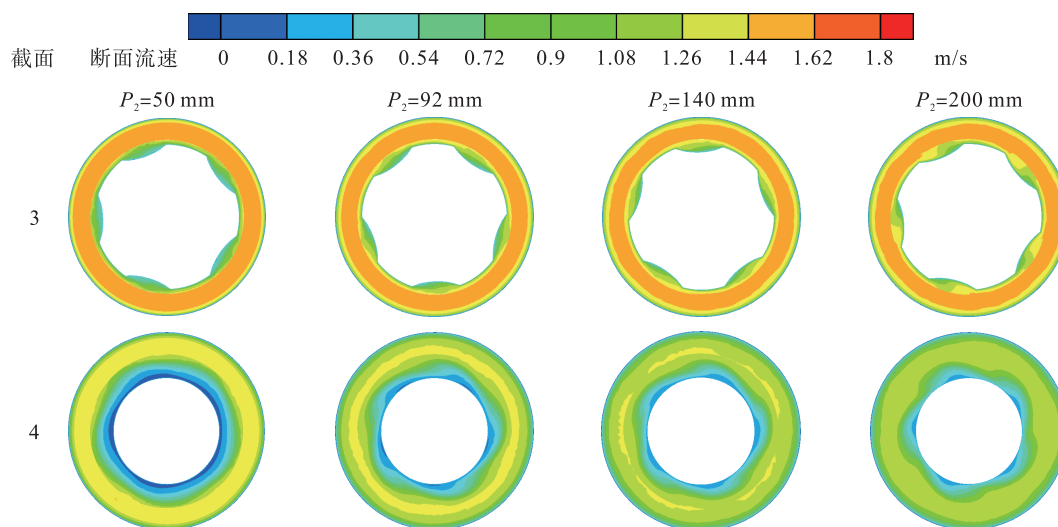


图11 第二段螺旋槽道叶片螺距对速度场的影响图
Fig. 11 Effect of different pitch of the second spiral channel on velocity field

图12进一步给出了基于Q准则以速度着色的环空流场的涡量等值面图。由图12可知,第二段螺旋槽道的叶片螺距为50 mm时与其他工况对比,钻杆以及环空流场产生的涡量更大,更有利于带动岩屑做旋转运动把岩屑导向井眼上方。

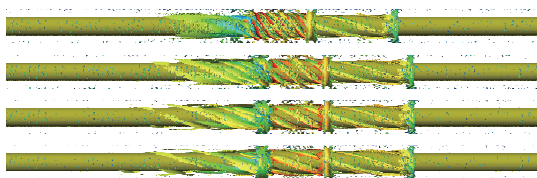


图12 基于Q-准则的涡量等值面图

Fig. 12 Vorticity isosurface map based on Q-criterion

4 结论

1)螺旋槽道形状对岩屑清除工具的性能有很大的影响,通过对三种不同螺旋槽道形状的岩屑清除工具的流场进行对比分析,结果表明:双段螺旋型结构的性能优于简单螺旋和直楞型结构的岩屑清除工具。

2)双段螺旋槽道结构的岩屑清除工具的性能受两段螺旋槽道长度比例、第一段以及第二段螺旋叶片的螺距影响。在螺旋槽道总长不变的情况下,适当增大第二段螺旋槽道的长度,有利于提高其性能;第一段螺旋叶片的螺距对岩屑床清除工具的性能影响较小;第二段螺旋叶片的螺距对岩屑床清除工具的性能影响较大,在满足结构设计的前提下,螺距越小性能越好。

参考文献:

- [1] 魏文忠,刘永旺,管志川,等.一种用于大斜度大位移井岩屑床清洁的新装置[J].石油天然气学报,2006,28(5):138-140.
Wei Wenzhong, Liu Yongwang, Guan Zhichuan, et al. New Device of Clearance Cutting Bed in Large Inclination and Distant Displacement [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28 (5): 138-140.
- [2] 陈红伟,郝振宪,何汉坤,等.水平井设计应用与展望[J].钻采工艺,2004,27(5):8-9.
Chen Hongwei, Hao Zhenxian, He Hankun, et al. The Method of Horizontal Well Geologic Design [J]. Drilling & Production Technology, 2004, 27 (6): 8-9.
- [3] 徐天用,裴道中,黄立新,等.大位移水平井常见问题机理分析及对策[J].钻采工艺,2001,24(5):22-25.
Xu Tianyong, Pei Daozhong, Huang Lixin, et al. Analysis and Countermeasure About Common Downhole Problem in Extended Reach Well [J]. Drilling & Production Technology, 2001, 24 (5): 22-25.
- [4] 孙晓峰,闫铁,王克林,等.复杂结构井井眼清洁技术研究进展[J].断块油气田,2013,20(1):1-5.
Sun Xiaofeng, Yan Tie, Wang Kelin, et al. Research Progress of Hole Cleaning in Complex Structure Well [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2013, 20 (1): 1-5.
- [5] 王志民,谭丽娟,陈胜,等.克深地区井壁稳定性评价及钻井工程应用[J].天然气与石油,2018,36(2):73-78.
Wang Zhimin, Tan Lijuan, Chen Sheng, et al. Evaluation of Wellbore Stability in Keshen Area and Drilling Engineering Application [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36 (2): 73-78.
- [6] 贾丽丽.大位移水平井常见问题机理分析[J].化工设计通讯,2017,43(6):230.
Jia Lili. Analysis of Common Problems in Large Displacement Horizontal Wells [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2017, 43 (6): 230.
- [7] 张洪泉,任中启,董明健.大斜度大位移井岩屑床的解决方法[J].石油钻探技术,1999,27(3):6-8.
Zhang Hongquan, Ren Zhongqi, Dong Mingjian. Methods to Solve Cuttings Bed in High-Inclination, Long-Reached Well [J]. Petroleum Drilling Techniques, 1999, 27 (3): 6-8.
- [8] 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):125-132.
Wang Haige, Liu Xisheng, Li Hongqian, et al. An Experimental Study of Transport of Drilling Cutting in a Horizontal Well [J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16 (4): 125-132.
- [9] 李志勇,李鸿飞,张立新,等.大牛地气田新型防塌钻井液研究及应用[J].石油钻探技术,2016,44(3):39-43.
Li Zhiyong, Li Hongfei, Zhang Lixin, et al. Development and Field Applications of a New Anti-Sloughing Drilling Fluid System in Daniudi Gas Field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44 (3): 39-43.
- [10] 王克林,刘洪涛,程红伟,等.存在岩屑床的水平环空钻井液紊流CFD模拟[J].断块油气田,2017,24(1):116-119.
Wang Kelin, Liu Hongtao, Cheng Hongwei, et al. CFD Simulation of Turbulent Drilling Fluid Flow in Horizontal Annuli with Cuttings Bed [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2017, 24 (1): 116-119.
- [11] 刘世界,雷英,秦鹏,等.一种钻井液四参数流变模型[J].天然气与石油,2019,37(4):78-82.
Liu Shijie, Lei Ying, Qin Peng, et al. A Four-Parameter Rheological Model of Drilling Fluid [J]. Natural Gas and Oil, 2019, 37 (4): 78-82.
- [12] 李家学,黄进军,罗平亚,等.随钻防漏堵漏技术研究[J].钻井液与完井液,2008,25(3):25-28.
Li Jiaxue, Huang Jinjun, Luo Pingya, et al. Researches on Mud Losses Prevention and Control [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2008, 25 (3): 25-28.
- [13] 角远江.海南区块大位移井环保型钻井液研制[J].天然

- 气与石油, 2016, 34(6): 72-77.
- Jue Yuanjiang. Research on Environmental Drilling Fluids of Extended Reach Well in Hainan Block [J]. Natural Gas and Oil, 2016, 34(6): 72-77.
- [14] 吴仲华, 孙浩玉, 聂云飞, 等. 岩屑床破坏工具流场的数值模拟[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(5): 83-85.
- Wu Zhonghua, Sun Haoyu, Nie Yunfei, et al. Numerical Simulation on Flow Filed Created by Cutting Bed Remover [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(5): 83-85.
- [15] 王智锋. 复杂结构井岩屑床清除技术[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(1): 102-104.
- Wang Zhifeng. Cuttings Bed Clearance of Complex Structural Wells [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(1): 102-104.
- [16] 孙浩玉. 岩屑床清除器设计及其流场仿真研究[J]. 石油机械, 2009, 37(12): 38-41.
- Sun Haoyu. Design of Cuttings Bed Remover and Simulation of Flow Field Created by It [J]. China Petroleum Machinery, 2009, 37(12): 38-41.
- [17] 李 皋, 肖贵林, 李小林, 等. 气体钻水平井岩屑运移数值模拟研究[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(4): 66-72.
- Li Gao, Xiao Guilin, Li Xiaolin, et al. Numerical Simulation for Cuttings Migration During Gas Drilling of Horizontal Wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(4): 66-72.
- [18] 陈 锋, 狄勤丰, 袁鹏斌, 等. 高效岩屑床清除钻杆作用机理[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 298-303.
- Chen Feng, Di Qinfeng, Yuan Pengbin, et al. Mechanism of an Effective Hydroclean Drill Pipe for Hole Cleaning [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 298-303.
- [19] 余万顺, 汪海阁, 纪国栋. 叶片形状对岩屑床清除工具作用效果的影响规律[J]. 断块油气田, 2017, 24(1): 120-124.
- Yu Wanshun, Wang Haige, Ji Guodong. Analysis on Function of Cuttings Bed Remover in Different Shapes [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2017, 24(1): 120-124.
- [20] 余万顺, 汪海阁, 纪国栋, 等. 螺旋形岩屑床清除工具流场数值模拟[J]. 断块油气田, 2018, 25(1): 122-125.
- Yu Wanshun, Wang Haige, Ji Guodong, et al. Flow Field Numerical Simulation of Spiral Cuttings Bed Removers [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(1): 122-125.
- [21] 李 田, 秦 登, 安 超, 等. 计算网格对列车空气动力学不确定性的影响[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(4): 816-822.
- Li Tian, Qin Deng, An Chao, et al. Effect of Computational Grid on Uncertainty in Train Aerodynamics [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(4): 816-822.

中国石油重大项目建设“全速前进”

2020年五一期间,从新疆塔里木盆地到广东石化,从阿布扎比巴布油田到尼日尔油田二期发电站,中国石油各大项目建设现场机器轰鸣,建设者奋战一线。

5月3日24时,随着最后18名作业人员撤出生产一部工作区,工程建设公司承担的广西石化2020年大检修全部装置经受住了产出合格产品后的72个小时考验,圆满收官。工程建设公司所属一建、七建公司承担了大检修1200余项工作。

4月30日,管道局在中俄东线(长岭—永清)7标段启动以“建功中俄勇担当,‘一带一路’我领航”为主题的“百日攻坚”劳动竞赛,围绕质量创优目标,确保焊口检测一次合格率高于95%,管道补口、补伤一次合格率高于98%,为按期、优质、高效完成施工任务保驾护航。目前,管道局参建的中俄东线(长岭—永清)2标段焊接突破100 km。项目部仅用12 d时间就完成了10 km的主体焊接量,CPPA 045机组创下36道焊口的日焊接纪录。

在塔里木乙烷制乙烯项目建设现场,中油一建、六建、吉林化建等公司全线铺开,几千名参建人员各负其责,十余辆钢结构运载体穿梭梭现场。目前,乙烯主管廊、分离一区、分离二区、压缩区管廊钢结构柱已基本完成安装,开始横梁安装;急冷管廊开始安装;全厂A、D、C管廊钢结构梁柱成片安装已完成20%。

巴布油田综合设施项目是集团公司十大重点项目之一。五一期间,工程建设公司海湾地区公司做好防暑降温、疫情防控、项目生产、员工心理疏导等工作,实现项目安全运行、提质增效工作协调发展。俄罗斯阿穆尔天然气处理厂项目全员坚守岗位,整体进度超前4.3%,累计实现2100万安全人工时。

(王 路 摘自中国石油新闻中心网)