

井下多参数测量短节的结构耐冲蚀优化分析

安金刚¹ 庞瑞豪² 查春青²

1 四川天石和创科技有限公司 2 北京工业大学

DOI:10.32629/etd.v7i2.18941

[摘要] 实时获取近钻头工程参数测量是旋转导向钻井技术的关键。本文基于应变测试技术研制了一种井下多参数测量短节,但其通讯口活塞环端面在井下存在严重冲蚀。为提升其可靠性,研究重点对该短节的易损结构进行了抗冲蚀优化。值模拟分析表明,结构优化前钻井液最大冲蚀率为 $2.77 \times 10^{-3} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,优化后降至 $5.24 \times 10^{-4} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,证明结构改进可显著减轻冲蚀损伤。该研究为井下测量工具在颗粒流中的耐久性设计提供了有效方案。

[关键词] 冲刷侵蚀; 砂粒; 测量短节; 结构优化

中图分类号: P588.21+2.1 文献标识码: A

Structural Erosion Resistance Optimization Analysis of Downhole Multi-Parameter Measurement Subs

Jingang An¹ Ruihao Pang² Chunqing Cha²

1 Sichuan Tianshi Hechuang Technology Co., Ltd

2 Beijing University of Technology

[Abstract] Real-time acquisition of near-bit engineering parameters is essential for rotary steerable drilling technology. In this study, a downhole multi-parameter measurement sub was developed based on strain testing technology. However, severe erosion was observed at the end face of the communication port piston ring under downhole conditions. To enhance its reliability, the research focused on optimizing the vulnerable structure of the sub for erosion resistance. By simulating and analyzing the erosion process and effects of drilling fluid before and after structural optimization using numerical simulation software, it was confirmed that the structural improvements significantly mitigate erosion damage. This study provides an effective solution for enhancing the durability design of downhole measurement tools in particle-laden flow environments.

[Key words] Erosion; Measurement Sub; Structural Optimization; Sand Particles

随着石油勘探开发向更深、更复杂的地层推进,深井、超深井、水平井等复杂结构井日益增多,对井眼轨迹的精确控制提出了更高要求。旋转导向钻井技术通过持续旋转的钻柱驱动钻头沿设计轨道钻进,能够实现井眼轨迹的实时调整与控制^[1-3]。该技术成功实施的一个关键前提,在于实时获取近钻头处的钻井工程参数,如钻压、扭矩、侧向力等^[4-5]。设计并安装在近钻头位置的钻铤短节,集成了先进的传感器系统,能够实时、准确地采集钻压、扭矩、侧向力等关键工程参数。这些数据如同钻井工程的“眼睛”,为优化钻井参数、识别井下复杂工况(如卡钻、井漏等)、预防钻具失效事故提供了直接依据,对实现安全、高效、可控的钻井作业具有不可替代的价值。因此,围绕随钻参数测量工具及其相关技术的研究,一直是钻井工程领域持续投入的重点议题。

国内外的研究已取得显著进展,例如胜利石油工程公司采

用“补偿式”测量方法,通过优化应变片布置来消除弯矩干扰,提高了数据的准确性^[6]。当前对井下工程参数随钻测量技术的研究,呈现出多元发展的态势。其中,LIU Y.等^[7]的工作侧重于监测手段,他们提出的综合动态监测方法融合了新型测量仪与处理模型,旨在精确获取井下摩阻力和扭矩数据。为探究钻具组合的动力行为,LI C.等^[8]则专门设计了集成试验台,其研究内容涵盖了近钻头力测量,并创新性地验证了以钻柱为载体进行井下数据声传输的可行性。在系统设计与验证方面,HU Z.等^[9]贡献了一套完整的随钻测量方案,该方案兼顾了硬件集成与软件设计,最终通过现场实验证明了系统的稳健性。赵龙等^[10]为了研究测量短节中弹性元件的综合性能,通过构建多目标参数优化模型来探讨结构参数中测量灵敏度、结构刚度与强度之间的关系,对拟定结构进行有限元分析,以验证结构的测量性能及强度。然而,现有的近钻头测量短节在井下恶劣工况下面临严峻

挑战,其中结构可靠性问题尤为突出。测量短节为实现数据传输等功能,其外壳常设有通讯接口等开口结构,这些部位在高速钻井液的持续冲刷下极易发生冲蚀损伤^[11]。例如,有限元分析表明,较孔孔边、圆孔处以及各个台阶和沟槽处会出现明显的应力集中,这些位置也往往是冲蚀的薄弱环节。

针对上述问题,一般的解决思路主要集中在材料优化(如选用耐磨蚀材料)和结构优化设计两个方面。在结构设计方面,通常会运用计算流体力学(CFD)数值模拟方法分析钻井液流场,通过优化流道形线和关键部位的几何结构来减小局部冲蚀^[12-14]。本文针对所研制测量短节的通讯口活塞环端面在井下出现严重冲蚀的问题,提出了一种基于流场优化理念的结构抗冲蚀改进方案。本研究采用计算流体力学(CFD)数值模拟方法,首先对发生冲蚀的活塞环端面结构进行精确的三维参数化建模,建立钻井液在测量短节内部及关键部位流动的冲蚀模型,进而精确模拟分析结构优化前后钻井液的流场分布、速度矢量、颗粒轨迹及冲蚀速率。基于数值模拟结果,重点对易产生湍流的通讯口活塞环端面等部位进行几何结构优化(如改善过渡圆角、优化流道轮廓等),以平顺流场,降低颗粒对壁面的冲击能量和频率。

1 多参数测量短节总体结构

多参数测量短节的整体结构如图1所示。该工具主要由上接头、通讯口环塞环、变径接头、中间连接器、承压筒、尾椎和下接头等组成,高压钻井液流入该工具的侧边和内部放置的应变片,进而可测量井下钻压、扭矩、侧向力以及井下环空压力等参数。在多参数测量短节中,通讯口活塞环的设计至关重要,它主要负责在钻柱连续旋转和往复运动过程中,实现不同工具节段之间电力与数据信号的稳定传输。然而,该活塞环的前端面直接暴露于高压钻井液中,会遭受严重冲蚀。一旦发生冲蚀,将导致该零部件的整体强度和接触面平整度下降,进而引起电气接触电阻增大、信号传输不稳定甚至中断,使得钻压、扭矩等关键参数无法实时上传。

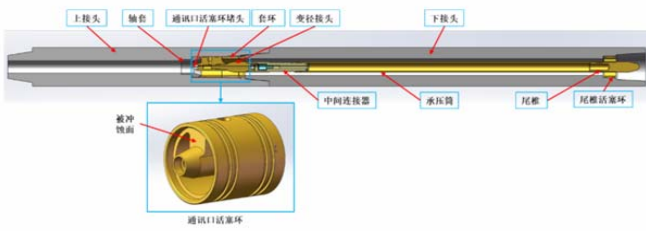


图1 多参数测量短节的结构

2 数值模拟

此次研究控制方程使用Navier-Stokes方程,湍流模型采用Realizable $k-\epsilon$,采用纯水和惰性颗粒石英砂混合溶液替代钻井液,石英砂采用直径为 $2e-4$ m的圆球颗粒,冲蚀颗粒设置在入口面上。冲蚀模型采用Okamoto模型,因为Okamoto模型的核心公式是通过拟合金属、陶瓷、聚合物等多种靶材,在不同冲击角度、速度和

颗粒条件下的海量实验数据而建立的^[15]。其对材料属性的考虑更全面,公式中明确包含了靶材的维氏硬度,使得模型能够量化不同硬度材料的抗冲蚀能力差异。此次靶材的维氏硬度设置为铍铜的维氏硬度。

在模拟异径弯管的冲蚀过程时,合理设定壁面碰撞系数至关重要。该系数通常由碰撞恢复系数表示,用以量化粒子与壁面碰撞后因能量损耗而导致回弹速度降低的程度。研究表明,颗粒的入射率是影响恢复系数值的关键参数。本文采用的壁面碰撞恢复方程综合了已有研究成果,能较好地描述此类碰撞行为^[16]:

$$\epsilon_N = 0.993 - 0.0307\theta + 4.75e^{-4\theta^2} - 2.61e^{-6\theta^3} \quad (1)$$

$$\epsilon_T = 0.998 - 0.029\theta + 6.43e^{-4\theta^2} - 3.56e^{-6\theta^3} \quad (2)$$

为了优化通讯口活塞环的结构,减少高压钻井液中的颗粒对通讯口活塞环前端的冲蚀,利用FLUENT软件对此工具的内部进行流体冲蚀的数值模拟。本文对该通讯口活塞环进行了两次结构优化,然后分析结构优化前后是否减少了钻井液对活塞环前端的冲蚀作用。不同的结构对应不同的数值模拟模型,如图2所示,设计了三种不同的前端面。图3为A结构所对应的计算流体域及其网格划分,入口流量为30L/s,出口为自由出口,由于前端面的结构较复杂,所以采用六面体网格进行网格划分。

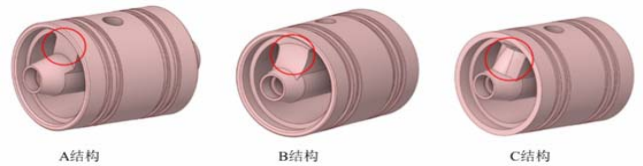


图2 通讯口活塞环的三种前端面结构

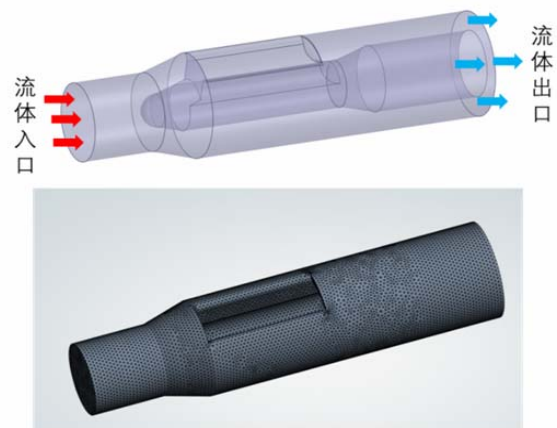


图3 计算流体域及其网格划分

3 仿真结果分析

图4为钻井液冲蚀A结构时所对应的颗粒轨迹和冲蚀率云图。钻井液在冲蚀A结构前端面后,其流速快速减小,且流体的流线逐渐变得紊乱。图4显示A结构前端面的冲蚀率云图,其最大冲蚀率在前端面的两侧,最大冲蚀率为 $4.11e-3$ kg/($m^2 \cdot s$)。钻井

液流经通讯口活塞环时,垂直撞击A结构的前端面,流速在极短时间内骤降至近乎为零,这将巨大的动能瞬间转化为对壁面的冲击压强,破坏材料表面。

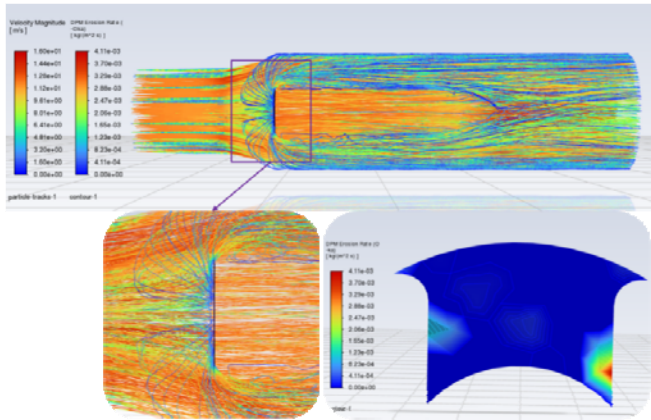


图4 A结构的颗粒冲蚀轨迹以及冲蚀率云图

图5显示:虽然B结构的前端面做了圆角的处理,钻井液在经过B结构的前端面之后,钻井液的流线轨迹较平滑规则,但是钻井液的流速依然有快速的衰减。并且B结构前端的两侧,受到严重的流体冲蚀,最大冲蚀率为 $3.95e-3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。圆角改变了固体颗粒的运动轨迹,当流体(尤其是含有固体颗粒的流体)流过弯曲表面时,会因离心效应产生垂直于主流方向的漩涡,即二次流。这种流动会将固体颗粒从主流区“甩”向结构的侧面并聚集起来,导致这些局部区域的颗粒浓度远高于平均值,从而遭受更密集、更频繁的冲击,造成局部严重冲蚀。

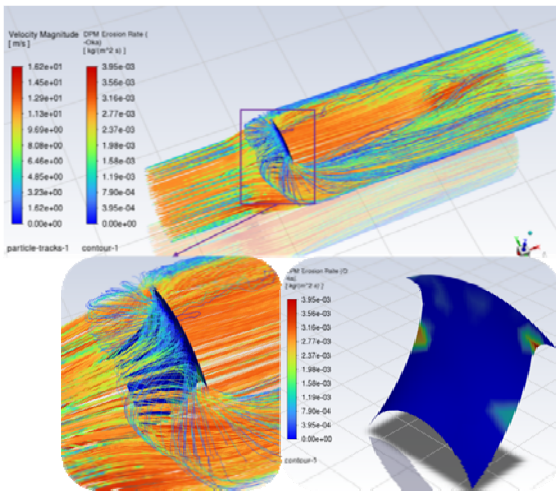


图5 B结构的颗粒冲蚀轨迹以及冲蚀率云图

图6显示:钻井液在经过C结构的弧形前端面后,钻井液的流线轨迹平滑规则,并且钻井液的流速并没有较明显的减速。最大冲蚀率在前端面的上端部分,最大冲蚀率为 $5.24e-4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。这是因为C型弧形前端面设计,在有效引导流体、避免因流速突变或流场紊乱导致局部严重冲蚀的同时,最大限度地维持了流体动量,实现了低阻力、低能耗的流动状态。

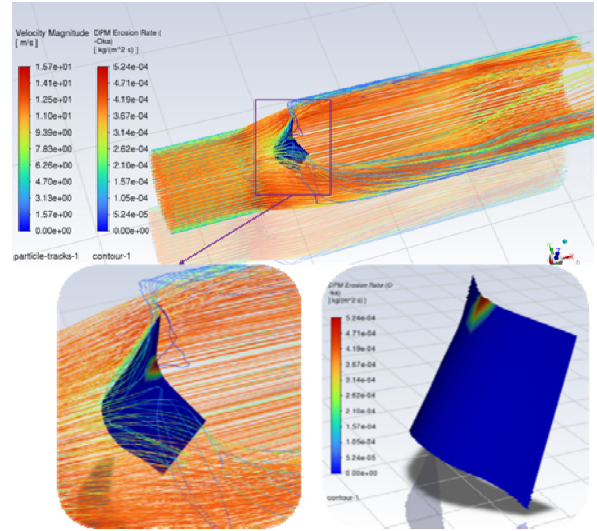


图6 C结构的颗粒冲蚀轨迹以及冲蚀率云图

图7显示C型结构的最大冲蚀率仅为 $5.24e-4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,相较于优化前的A型结构和仅做圆角处理的B型结构,降幅分别达到87.3%和86.7%,抗冲蚀性能得到大幅提升。

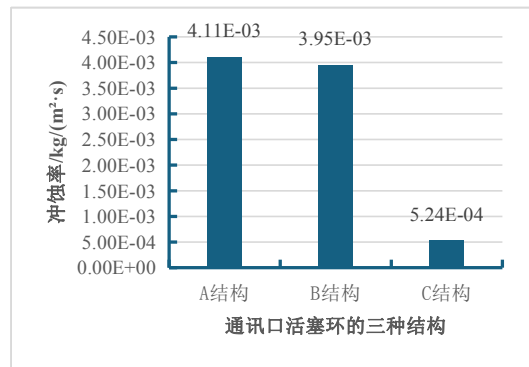


图7 不同结构对应的最大冲蚀率

4 结束语

基于所设计的多参数测量短节(可测量钻压、扭矩、侧向力等),通过FLUENT软件对其内部流场进行流体的冲蚀仿真,研究得到如下结论:

(1) 结构优化显著改善了流场特性,C型弧形前端面表现最优。优化后的C型结构(弧形前端面)能够有效引导钻井液流动,使其流线保持平滑、规整,避免了流动分离和明显的流速衰减,表明其流体阻力最小,能量损失最低,从而从流动机理上降低了冲蚀风险。结构优化有效降低了最大冲蚀率,C型结构抗冲蚀性能最佳。

(2) 数值模拟结果定量表明,C型结构的最大冲蚀率仅为 $5.24e-4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,相较于优化前的A型结构和仅做圆角处理的B型结构,降幅分别达到87.3%和86.7%,抗冲蚀性能得到大幅提升。

(3) 最优结构能平衡流动引导与能量保持,是提升可靠性的关键。综合来看,C型弧形前端面设计,在有效引导流体、避免因流速突变或流场紊乱导致局部严重冲蚀的同时,最大限度地维

持了流体动量,实现了低阻力、低能耗的流动状态。为解决测量短节通讯口等关键承压密封面的冲蚀损伤问题,提供了一种有效的结构优化方向,对提升工具井下工作可靠性具有重要意义。

[参考文献]

[1]马天寿,陈平,黄万志,等.钻井井下工程参数测量仪研究进展[J].断块油气田,2011,18(3):4.

[2]葛亮,胡泽,陈平.井下工程参数随钻测试系统设计[J].传感器与微系统,2013,32(08):105-107.

[3]邓洪涛.井下工具可靠性设计[J].石化技术,2016,23(06):280.

[4]王旭东,陈平,张杰.井下钻井工程参数测量系统设计[J].西南石油大学学报(自然科学版),2010,32(05):155-160+197.

[5]孙召红,房军,盛利民,等.井底钻压扭矩传感器设计与分析[J].石油矿场机械,2010,39(04):65-68.

[6]崔玖菊.井下工程参数随钻测量短节的优化设计[J].中国化工贸易,2019,11(015):31.

[7]Liu Y, Mats, Chen P, et al. Method and apparatus for monitoring of downhole dynamic drag and torque of drill-string in horizontal wells[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 164: 320-332.

[8]Li C, Ding T H, Wang P. An experimental rig for near-bit force measurement and drill string acoustic transmission of

BHA[J]. Measurement, 2011, 44(4): 642-652.

[9]Hu Z, Xie X H, Ge L, et al. Research on the system of down-hole engineering parameters measure while drilling[J]. Open Petroleum Engineering Journal, 2014, 7: 149-153.

[10]赵龙,闫怡飞,闫相祯,等.基于NSGA-II的近钻头测量短节弹性元件结构优化[J].石油机械,2019,47(12):15-22+30.

[11]付英军,马天寿,陈平,等.井下工程参数测量短节的有限元分析[J].石油机械,2011,39(05):34-37.

[12]王志敏,刘飞,廖刚.一种高抗冲蚀节流阀性能特点及现场应用[J].钻采工艺,2017,40(05):111-114.

[13]张绍文.节流阀冲蚀性能仿真分析与试验研究[J].石化技术,2020,27(02):316+323.

[14]李红平.含砂页岩气弯管冲蚀模拟研究[J].石化技术,2021,28(03):89-90.

[15]Y. I. Oka, K. Okamura, T. Yoshida, Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation[J]. Wear, Volume 259, Issues 1-6, 2005, Pages 95-101.

[16]秦伟杰,张强,夏成宇,等.盲通管与直弯管的内壁液固双相流冲蚀数值模拟初探[J].材料保护,2020,53(02):61-66+73.

作者简介:

安全刚(1981—),男,汉族,吉林省永吉县人,硕士研究生,副高级工程师,研究方向:旋转导向系统井下多参数测量技术研究。