文章编号:1673-5005(2012)04-0088-05

不扩孔径向水平井钻管转向仿真研究

·徐金超',杨永印',李新辉2,李 楠3

(1. 中国石油大学 石油工程学院,山东 青岛 266580; 2. 胜利油田 黄河钻井五公司,山东 东营 257000;
3. 长城钻探地质研究院,辽宁 盘绵 124010)

摘要:针对177.8 mm 套管内部空间尺寸的约束条件,建立转向器弯曲导向滑道及钻管模型,利用 ANSYS 软件,对钻 管通过转向器滑道的转向过程进行有限元仿真研究。仿真结果表明:在钻管弯曲转向时钻管弯曲内侧更易发生失 稳;转向器滑道曲率变化率是个非常重要的参数,钻管应力、截面变形、钻管阻力都与其有关,为了使钻管以低应力、 较为安全的状态通过转向器,减小滑道轨迹的曲率变化率是必要的方式;材料为 X 的钻管可以安全穿过滑道,钻管 转向后可以沿滑道水平钻进,钻管变形保持在许可范围内,能够满足径向水平井的钻进要求。

关键词:水平井;钻管;滑道;转向;仿真

中图分类号: TE 243 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn. 1673-5005.2012.04.016

Simulation on drill pipe's bending in non-reaming radial horizontal well

XU Jin-chao¹, YANG Yong-yin¹, LI Xin-hui², LI Nan³

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. 5th Yellow River Drilling Company of Shengli Oilfield, Dongying 257000, China;

3. Geology Institute of Greatwall Drilling Engineering Company, Panjin 124010, China)

Abstract: For constrains of internal space in the casing with the diameter of 177.8 mm, a slide way guided by the steering gear as well as a drill pipe model was established to make finite element simulation research for the steering process with AN-SYS software. The results show that the inner side of the bending drill pipe destabilization occurs easily in steering. The velocity of steering gear curvature variation is an important parameter, and the drill pipe stress, section deformation and drill pipe resistance are correlated with it. It's necessary to decrease the velocity of slide track curvature variation in order to make the drill pipe pass through the steering gear in a low stressful and safe sate. The drill pipe made of X material can pass through the slide way safely and keep along the horizontal direction after steering. In this process, the deformation of the pipe is maintained within the limits so that it can meet the requirements of radial horizontal well drilling.

Key words: horizontal well; drill pipe; slide way; steering; simulation

传统的径向水平井钻进时,在下放转向器之前必须进行套管段铣和扩孔操作,为大尺寸转向器提供空间。大直径扩孔是指将原井眼的井径扩大至 600 ~ 650 mm 的过程,由于扩孔直径大,导致扩孔难度大,严重制约了径向水平井的发展。因此,研制一种不需扩孔的转向器系统成为一种必然趋势^[15]。采用不扩孔技术的关键在于寻找合适的材料及尺寸的钻管,使其在转向半径约为 100 mm 的情况下稳定穿过转向器 滑道,并且钻管转向后的各项性能指标符合径向水平 井的钻进要求。笔者利用 ANSYS 软件对钻管通过转 向器过程进行仿真模拟,根据弯曲转向后的钻管形态 及力学表现,对钻管是否失稳进行评价,并对钻管转 向时所表现出的各种规律进行分析。

1 仿真模型的建立

1.1 模拟采用的滑道轨迹

为了充分利用转向空间,减小钻管穿过转向器 时的阻力,采用钻管靠近套管壁一侧进人转向器滑

收稿日期:2011-12-26

基金项目: 国家科技重大专项课题(2008ZX05022)

作者简介:徐金超(1984-),男(汉族),黑龙江牡丹江人,博士研究生,主要从事采油机械及钻井方面的研究。

万方数据

道以增大转向半径,转向器滑道的轨迹选择单圆弧 +矫直反弯圆弧+矫直直线段的形式,即钻管由转向 器一侧下入转向轨道,经过转向段、反弯段进入水平 矫直段。转向轨迹的具体参数如图1所示。转向半 径为100mm,转向段圆弧与反弯段圆弧圆心连线与 铅垂线角度为6°,矫直压下量为0.99mm。当钻管垂 直进入转向器滑道时,经过转向段入口点,转向段与 反弯段连接点、反弯段与直线段连接点3个曲率变化 点,其中转向段与反弯段的连接点处曲率变化最大。





1.2 实体模型的建立及网格划分

本文模型选用无缝钢管作钻管,选用某材料牌 号为 X,该材料的塑性变形能力较强,延展性好,弹 性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3, 屈服强度为 345 MPa,拉断强度为 510 MPa,拉断应变为 0.276。

钻管在转向器中导向行进属于刚体—柔体的接 触,接触方式为面—面接触,将滑道作为刚体,钻管 作为柔体。在有限元仿真模型中,转向器滑道采用 管状体模型,钻管模型不作简化。钻管的接触区域 取两侧 110°的弧形区域,滑道模型中去掉不接触的 部分。采用直线段近似模拟滑道截面形状的内弧 线^[73],实体模型如图 2 所示。



图 2 实体模型中的钻管与滑道截面 Fig. 2 Drill pipe and slide section of real model

生成接触对之前需要对钻管及滑道进行网格划 分,选 Solid95 单元,沿 0.5 m 长钻管划分为 70 等 份,转向器滑道单元为 7 mm,采用扫掠实体划分钻 管实体,生成钻管有限元模型。共生成 2 074 个单 元,12349个节点,如图3所示。



图 3 划方网格启的有限几候型 Fig. 3 Finite element mesh model

1.3 接触对的建立及参数设置

仿真模型中,钻管与滑道的接触部分需要生成 接触对。选取组成滑道内表面的各曲面作为接触对 的目标面,选用 TARGE170 为目标单元;选取钻管 对应侧的表面作为接触对的接触面,选用 CON-TA174 为接触单元。覆盖在钻管表面的是接触单 元,覆盖在滑道内表面的是目标单元。

钻管在转向器中运动,其摩擦情况较复杂,既有 滚动摩擦又有滑动摩擦,定义钻管模型的材料性能, 仿真试验中摩擦系数取0.02,接触刚度系数设置为 0.01,侵透系数设定为0.6。

1.4 仿真模型的约束及载荷

钻管在弯曲转向过程中承受内压力、滑道对钻管 的支持力和摩擦力,尾部受控制光杆的约束作用以及 射流对钻管前端的反作用力作用。滑道与钻管相比 刚性较大,其变形忽略不计,对滑道模型施加零位移 约束,使其固定不动。在钻管尾端面上施加位移约 束,让其在 xoy 平面内运动。在钻管的内表面加面压 力 p 为 40 MPa,钻管前端面上施加射流反作用力 F₂。

2 仿真结果分析

2.1 相同壁厚不同直径钻管的模拟

选用直径分别为 $d_1 = 12 \text{ mm} \sqrt{d_2} = 14 \text{ mm} \sqrt{B B B} p_1$ = 1.5 mm 的钻管进行模拟,模拟后的 von-mises 应 力分布如图 4 所示。

(1)由图 4 可以看出,应力的最大点都位于钻 管矫直段, $\sigma_{max}^{V}|_{d_1=12 mm} = 448 MPa; \sigma_{max}|_{d_2=14 mm} = 464 MPa 两种钻管的最大应力都小于其最大允许抗$ 拉强度 510 MPa,同时由于轨道提供刚性约束,而且钻管中性面提供变形制约,因此两种钻管都可以在不失稳的状态下穿过转向器滑道。由应力图可以明显看出;直径大的钻管最大 von-mises 应力明显比直

万方数据

· 89 ·

径小的要大,这说明对于材料与壁厚相同的钻管,在 同样的轨道形式下弯曲转向时,直径大的钻管更易 达到其破坏强度。 (2)从钻管穿出转向器的效果来看,两种钻管 都能比较笔直地沿转向器矫直段穿出。



图 4 不同直径钻管的 von-mises 应力分布



2.2 相同直径不同壁厚钻管的模拟

选用直径为12 mm、壁厚为2 mm 的 X 钻管进 行模拟,钻管的 von-mises 应力分布如图 5 所示。



图 5 直径 12 mm,壁厚 2 mm 钻管 von-mises 应力图 Fig. 5 Von-mises stress diagram of drill pipe with diameter of 12 mm, thickness of 2 mm

(1) 从钻管穿出转向器滑道的安全稳定性来 看, σ_{max} = 444 MPa,钻管的,von-mises 应力小于材料 的最大拉断应力 510 MPa,因此这种钻管会安全稳 定地通过转向器。

(2)从钻管穿出转向器的效果来看, 壁厚 1.5 mm 的钻管穿出转向器后更加水平, 而壁厚 2 mm 的 钻管穿出转向器后虽然略微向上倾斜, 但是钻管却 是笔直的, 不会与地层发生干涉, 因此都是可行的。

在满足抗内压要求并且转向过程不失稳的情况 下应选择内径较大的钻管,故选择直径 14 mm、壁厚 1.5 mm 的钻管。

2.3 钻管应力分布

定义钻管弯曲内、外侧两条路径,路径 1:x=7 mm,y 为单元节点对应坐标,z=0;路径 2:x=-7 mm,y 为单元节点对应坐标,z=0。用后处理 LIST 命令提取最后一个载荷步结束时路径上所有节点 von-mises 应力,将所有应力数据导入 EXCEL 中绘 制 von-mises 应力沿钻管的分布,结果如图 6 所示。



图 6 von-mises 应力沿钻管弯曲内外侧的分布 Fig. 6 Von-mises stress distribution along the curve of inner and outer drill pipe

图 6 中显示应力分布的变化规律与转向器滑道 曲率变化率的规律基本一致,应力最大值都位于曲 率突变点。因此,为了使钻管以低应力、较为安全的 状态通过转向器,减小滑道轨迹的曲率变化率非常 必要。由图 6 还可以看出,进入矫直段后,钻管弯曲 内侧的 von-mises 应力值明显大于弯曲外侧的应力 值,因此可以说钻管弯曲内侧是更易发生失稳破坏 的区域。

2.4 滑道阻力数据分析

滑道阻力数据的提取是在时间历程处理器 (post26)中完成的,提取钻管末端面施加位移约束的 主节点的反力F,,所有节点在y轴方向作用力之和即 为F,。经过数据处理得到阻力变化曲线如图7所示。

从图 7 中可看出:滑道曲率的变化是滑道阻力 变化的主要原因,滑道阻力总是在滑道曲率变化处 单调增加,在相同的滑道曲率段缓慢增加或保持不 变,阻力增加的速率与滑道曲率变化速率相对应,曲 率变化速率越大阻力增加的速率也越大;在穿过转 向器后,滑道阻力几乎保持不变,因此从减阻措施和 改善滑道的动态特性来说,转向器滑道曲率变化速 率越小越好;滑道矫直段的反向弯曲段曲率变化较 大,是产生阻力的一个重要原因,所以,矫直段的设

万方数据

计应避免反复弯曲矫直,应以一次弯曲矫直为宜。



图 7 钻管弯曲转向过程阻力变化曲线

Fig.7 Drill pipe bending and steering resistance curve

2.5 钻管截面变形规律

钻管沿滑道弯曲转向后,钻管截面的变形主要 是椭圆化,钻管截面变形如图 8~10 所示。



图 8 钻管长短轴尺寸变化

Fig. 8 Drill pipe size change along long and short axis



图 9 钻管短轴壁厚变化

Fig. 9 Wall thickness change of drill pipe short axis



由图 8~10 可以总结出钻管截面变形的以下特点:

(1)钻管截面变形是钻管内压力与滑道对钻管 的支持力综合作用的结果,截面尺寸的变化与滑道 曲率有很大关系,曲率突变处,截面变形较大,非滑 道曲率突变点处的钻管截面变形比较缓慢。

(2)钻管转向过程中,壁厚变化与钻管弯曲转

向时钻管内外壁的拉压状态有关,总体表现为,受拉 时壁厚变薄,受压时壁厚增大。钻管头部的截面变 形与钻管其余部分不同,长、短轴尺寸在这段长度内 急剧变化,变形形态表现为上翘(图8)。

(3)在40 MPa的内压下,钻管截面长轴尺寸增 加的最大量为3.67%,短轴尺寸减小的最大量为 2.33%,钻管截面短轴壁厚增加和减小的最大量分 别为2.26%和3.33%,能够满足实际钻井要求。

(4)在钻管前端面变形历程中,长轴始终增大, 短轴始终减小,长轴的增大量一直小于短轴的减小 量(图10)。

2.6 钻管内压对弯曲转向的影响

提取水平段数据计算挠度,结果如图 11 所示。 从图 11 中可以看出,应力应变随着内压力的增大而 增加,钻管内压对钻管的矫直效果有明显的影响,对 于一定转向器的滑道,钻管矫直最好对应于一定的 内压力,钻管内压力低于这个值时残余弯曲将增大, 高于这个值时将引起反向残余弯曲。这表明钻管在 通过转向器时钻管内压力应保持在合适的数值,增 大压力或减小压力都将影响矫直效果。



Fig. 11 Comparison of horizontal deflection under different internal pressure

3 结 论

(1)在钻管弯曲转向时钻管弯曲内侧更易发生 失稳,对于同一转向器滑道,材料与壁厚相同的钻 管,直径大的钻管更易破坏。

(2)转向器滑道曲率变化率是个非常重要的参数,为了使钻管以低应力、较为安全的状态通过转向器,减小滑道轨迹的曲率变化率非常必要。

(3)有内压的钻管弯曲转向过程中,钻管长短轴 及壁厚的尺寸变化都小于5%,完全满足钻进要求。

(4)综合考虑钻管通过滑道的难易程度、钻管转向时的安全性、钻管矫直效果以及钻管几何尺寸 对钻井效果的影响,本文算例优选直径为14 mm、壁厚1.5 mm的X钻管。

万方数据

参考文献:

[1] 杨永印,杨海滨,王瑞和,等.超短半径辐射分支水平 钻井枝术在韦5井的应用[J].石油钻采工艺,2006, 28(2):11-14.

> YANG Yong-yin, YANG Hai-bin, WANG Rui-he, et al. Application of ultra-short radius radial wells drilling technology in Wei-5 well. [J]. Drilling & Production Technology, 2006, 28(2):11-14.

- [2] WADE Dickinson, HERMAN Dykstra, NEES I M, et al. The ultra-short radius radial system applied to thermal recovery of heavy oil[R]. SPE 24087, 1992.
- [3] 施達海,李永和,郭洪峰,等.高压水射流超短半径水 平井钻井技术[J].石油钻探技术,2001,29(5):21-22.

SHI Lian-hai, LI Yong-he, GUO Hong-feng, et al. The ultra-short radius horizontal drilling technology by using high pressure water jet [J]. Oil Drilling Technology, 2001,9(5);21-22.

- [4] LI Yonghe, WANG Chunjie, SHI Lianhai, et al. Application and development of drilling and completion of the ultrashort-radius radial well by high pressure jet flow techniques [R]. SPE 64756, 2000.
- [5] 刘衍聪,王慧艺,石永军.新型欠扩孔式超短半径水平 井转向系统设计[1].石油机械,2005.33(1):18-20.

(上接第83页)

- [12] DEMKOWICZ L. Computing with hp-adaptive finite elements: one and two dimensional elliptic and Maxwell problems [M]. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC Press, 2006.
- [13] 周本宽,陈大鹏.误差估计及其在自适应有限元分 析中的应用[J].西南交通大学学报,1990,75(1): 87-93.
 ZHOU Ben-kuan, CHEN Da-peng. Error estimation and

its application to adaptive finite element analysis [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1990, 75(1): 87-93.

[14] 周本宽,段梅.用于 h.收敛自适应有限元分析的一种事后误差估计[J].两南交通大学学报,1995,30 (6):645-649.

ZHOU Ben-kuan, DUAN Mei. A kind of a posteriori error estimate for h-convergence adaptive finite element analysis[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1995, 30(6):645-649.

[15] 魏红宁,周本宽.适于自适应网格加密的数据结构和 算法[J].西南交通大学学报,1996,31(6);78-84. WEI Hong-ning, ZHOU Ben-kuan. Data structures and logarithm suitable for adaptive mesh refinement [J]. LIU Yan-cong, WANG Hui-yi, SHI Yong-jun. Design of new reduced underreaming whipstock in ultrashort radius radial system[J]. China Petroleum Machinery, 2005, 33 (1):18-20.

[6] 郗祥远,周勇,钟桂香.不扩孔超短半径水平井用生产 管的可行性分析[J].石油矿场机械,2005,34(5):45-47.

XI Xiang-yuan, ZHOU Yong, ZHONG Gui-xiang. A study of non-radial expand of production tube in radial horizontal well[J]. Oil Field Equipment, 2005, 34(5); 45-47.

[7] 刘衍聪,岳吉祥,陈勇,等. 径向水平井钻杆弯曲转向 建模与阻力仿真研究[J]. 塑性工程学报,2006,13 (2);13-16.

> LIU Yan-cong, YUE Ji-xiang, CHEN Yong, et al. Research on the modeling of simulation of the drill pipe of URRS'turning and bending system and simulation of the resistance[J]. Journal of Plastic Engineering, 2006, 13 (2):13-16.

 [8] 王慧艺. 径向井钻杆参数工艺匹配性能研究[J]. 石油 矿场机械,2007,36(8):14..
WANG Hui-yi. Research on matching of technological parameters of drill-pipe for ultra-short radius radial system[J]. Oil Field Equipment,2007,36(8):14.
(编辑 李志芬)

Journal of Southwest Jiaotong University, 1996, 31(6): 78-84.

- [16] 周本宽,魏红宁.一种新型自适应误差估计方法 [J].西南交通大学学报,1997,32(5):469-476. ZHOU Ben-kuan, WEI Hong-ning. A new adaptive error estimator[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1997,32(5):469-476.
- [17] DUBCOVA L, SOLIN P, CERVENY J, et al. Space and time adaptive two-mesh hp-finite element method for transient microwave heating problems [J]. Electromagnetics, 2010, 30:23-40.
- [18] SOLIN P, CERVENY J, DOLEZEL I. Arbitrary-level hanging nodes and automatic adaptively in the hp-FEM [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2008, 77(1):117-132.
- [19] SOLIN P, DUBCOVA L, CERVENY J, et al. Adaptive hp-FEM with arbitrary-level hanging nodes for Maxwell's equations [J]. Advances in Applied Mathematics and Mechanics, 2010,2(4);518-532.
- [20] SOLIN P, SEGETH K, DOLEZEL I. Higher-order finite element methods[M]. Boca Raton: Chapman & Hall/ CRC Press, 2003.

(编辑 沈玉英)

万方数据