

# 水力振荡器降低摩擦阻力影响的分析

孙庆春<sup>1,2</sup>, 郭宝林<sup>1,3</sup>, 赵利锋<sup>2</sup>

(1. 西安石油大学石油工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 中石化华北石油工程有限公司五普钻井分公司, 河南 新乡 437000; 3. 中国石油集团西部钻探工程有限公司定向井技术服务公司, 新疆 乌鲁木齐 830026)

**摘要:**在斜井钻进中, 钻具基于重力影响会自然贴合下井壁, 并与井壁产生静摩擦阻, 滑动钻进中则进一步演变为托压现象, 常导致工具面摆置困难、机械钻速降低、单趟钻进尺减少等问题; 若活动钻具不及时, 则有可能引发钻具粘卡事故, 严重时致单井报废。因此, 降低摩擦阻、减缓托压已然成为安全钻井的重要环节。摩擦阻大小由钻柱自重和井眼轨迹法线方向上的分力和静摩擦系数来决定。在滑动钻进中, 技术人员往往通过向泥浆中添加润滑剂或进行短起下(目的为修整井壁)等方式来降低静摩擦系数, 从而达到降低摩擦阻、减缓托压的目的。由经典物理可知静摩擦阻大于滑动摩擦阻, 因此, 可以通过把静摩擦阻转化为动摩擦阻来减缓托压。通过摩擦成因分析、水力振荡器作用机理及其在苏里格气田、玉门油田和大庆油田等多口井的现场使用情况来评价水力振荡器的使用效果, 并通过玉门油田鸭 K1-7 井现场试验来分析水力振荡器使用中的注意事项。

**关键词:**滑动钻进; 摩擦阻力; 托压; 水力振荡器

**中图分类号:** TE242    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-7428(2015)12-0069-03

**Analysis on the Influence of Frictional Resistance Reduction by Hydraulic Oscillator/SUN Qing-chun<sup>1,2</sup>, GUO Bao-lin<sup>1,3</sup>, ZHAO Li-feng<sup>2</sup>** (1. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi 710065, China; 2. Wupu Drilling Company of North China Petroleum Bureau, SINOPEC, Xinxiang Henan 453700, China; 3. Xibu Drilling Direction Well Technique Service Limited, Urumqi Xinjiang 830026, China)

**Abstract:** In deviated well drilling, drill stems will naturally be pressed close to the borehole wall on the bottom side owing to the gravity with static frictional resistance produced, which will further evolve into backing pressure and lead to toolface, lower ROP and reduced drilling footage in a single trip; if not timely moving about the pipe, sticking accident is likely occur and even more with well abandoned. Therefore, friction reduction and backing pressure relieving become important parts of safe drilling. The magnitude of friction is decided by the component force and static friction coefficient of drill strings weight in borehole trajectory normal direction. In sliding drilling, some ways such as adding lubricant into the mud or making a short trip (for borehole dressing) were adopted to reduce the static friction coefficient for the purpose of reducing friction and relieving backing pressure. In term of the classical physics, the static friction is greater than sliding friction; therefore, backing pressure relieving can be achieved by transforming the static friction into slide friction. In this paper, the application effects are evaluated based on the cause analysis on the friction, the mechanism of hydraulic oscillator and its application in Sulige gasfield and Yumen, Daqing as well as some other oilfields. And the matters of attention in the use of hydraulic oscillator are discussed through the field test in Ya K1-7 well of Yumen oilfield.

**Key words:** slide drilling; frictional resistance; backing pressure; hydraulic oscillator

## 0 引言

钻井过程中, 钻具贴合下井壁会产生摩擦阻力, 摩擦阻力贯穿于整个钻井作业中。其中旋转钻进中摩擦阻力会让钻柱所承受的扭矩是所有工况下的最大值, 甚至会出现钻柱强度不够而导致钻具断裂。而滑动钻进会产生轴向摩擦阻, 一旦轴向摩擦阻大到完全平衡掉上部钻柱重力在轴向向上的分量<sup>[1-2]</sup>, 钻头便难以得到钻压, 钻头无钻压将无法钻进, 产生“托

压”现象<sup>[3]</sup>。这样不但会严重影响了水平井的钻井效率, 也容易引起压差卡钻等井下故障。为此相关研究人员做了多种尝试。其中优化井眼轨迹、在钻井液中加入润滑剂和使用滚道扶正器等方法可以有效地降低摩擦阻力, 同样的使用水力振荡器, 利用机械振动将钻具与井壁之间的静摩擦力转化为动摩擦力以降低摩擦阻力, 为我们水平钻进提供了一个新思路。

收稿日期: 2015-07-02; 修回日期: 2015-10-07

作者简介: 孙庆春, 男, 汉族, 1987年生, 工程师, 西安石油大学在读硕士, 石油与天然气专业, 从事有关于钻井工程的技术工作, 河南省新乡市红旗区洪门五普大院4号楼, 1410593917@qq.com。

## 1 滑动钻进中摩擦阻力影响机械钻速的机理

在斜井的钻井施工中,无法保证给钻头施加真实有效的钻压是水平段钻进中面对的主要问题之一,目前这已成为影响全井平均机械钻速及钻井周期的主要因素。原因是在斜井段钻进过程中,钻柱重力在垂直于井壁方向的分力  $N$  会产生摩擦阻力,从而导致钻压不能完全有效地施加于钻头之上。由摩擦力公式:

$$F = \mu N$$

可知,摩擦阻力取决于摩擦系数  $\mu$  和正压力  $N$ ,正压力  $N$  越大钻具在井壁上的摩阻力  $F$  越大,因此在摩擦系数不变的情况下,井斜越大或者斜井段钻具越重,摩擦阻力越大。另一方面由于钻柱本身的重力以及摩擦力影响,钻柱在受压时可能发生不同形式的弯曲,也称为屈曲。屈曲的钻柱在很大程度上增加了钻柱与井壁之间的接触力,从而使摩阻扭矩增大。屈曲行为越严重,钻柱与井壁的压力越大,从而造成摩阻与扭矩的急剧增大。使钻头不能获得有效钻压,降低钻井机械钻速并缩短水平井水平段的极限长度<sup>[4]</sup>。

在滑动钻进施工中,施加在钻头上的真实钻压  $T =$  指重表上大钩载荷的减小值  $t -$  钻柱与井壁之间的摩擦力  $F$ 。

当  $t < F_{\text{静}}$  时,  $T = t - F_{\text{静}} = 0$ , 钻头静止不动,钻具压缩,钻压  $T$  以钻柱弹性能量的形式积聚起来;这时司钻人员需要持续加压使钻压传递到钻头上。

当  $t = F_{\text{静}}$  时,  $T = t - F_{\text{静}} = 0$ 。

若继续加压,则  $t > F_{\text{静}}$ ,  $T = t - F_{\text{静}} > 0$ , 钻柱弹性能量瞬间释放,钻柱突然下滑,钻具与井壁发生相对运动,静摩擦力向动摩擦力转化,摩擦阻力  $F$  迅速减小。

虽然静摩擦力与动摩擦力之间的比例关系与其材料有关,一般来说动摩擦力是最大静摩擦力的 75%<sup>[5]</sup>。

这时,  $T = t - F_{\text{动}} = t - 0.75F_{\text{静}} > 0.25F_{\text{静}}$ 。

这时钻头突然撞击井底,甚至出现顿钻、憋泵和憋马达等不正常现象,严重时损坏钻头和井下动力钻具,这种钻柱弹性能力突然释放的现象称为钻柱“蛙动”<sup>[6]</sup>。托压瞬间释放,憋泵和憋马达后,工具面往往会不稳定。一旦出现工具面不稳定就需要上提活动钻具,重新摆工具面,而在托压环境中摆工具面需要花费大量时间,托压严重时每次摆工具面所

需时间 30 ~ 60 min。一方面,托压势必会降低机械钻速,延长了滑动钻进的时间,工具面不稳定不但耽误时间又会降低造斜效率,从而增加滑动钻进段的长度和比例;另一方面,频繁的憋泵、憋马达会降低螺杆和钻头的使用时间和使用效率。

## 2 水力振荡器组成及作用机理

在使用水力振荡器后,钻井液的动能转化为机械能,使钻柱产生 3 ~ 10 mm 左右的轴向蠕动,这种蠕动使井底钻具组合与井壁处于动摩擦状态,通过钻具传递给钻头,形成周期性连续柔和变化的钻压<sup>[7]</sup>。由本文上述讨论可知这样可以减少 1/4 的摩擦阻力。这样可以降低钻具的屈曲效应,降低摩阻和扭矩,提高滑动钻进中钻压传递效率,提高滑动钻进中的机械钻速。

National Oilwell Varco 公司生产出一种水力振荡器可以有效地实现静摩擦力向动摩擦力的转化,该水力振荡器主要有动力短节、盘阀短节和振荡短节 3 部分组成(见图 1)。

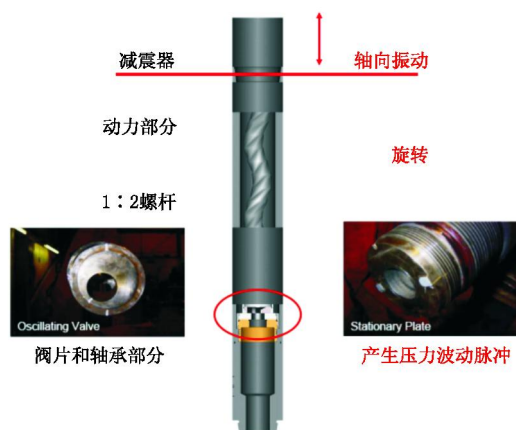


图 1 National Oilwell Varco 公司生产的水力振荡器结构

当钻井液通过动力短节时便会驱动转子摆动,转子往复摆动带动动阀在平面做来回运动,与定阀的中心孔周期性重合与分开,引起过流面积的变化,从而产生压力脉冲。当钻井液受到周期性的限制时,就会产生沿钻柱上传的压力脉冲。振荡短节内部的蝶形弹簧吸收及释放冲击能量来实现振荡短节轴向上、下振荡,从而实现水力脉冲转化为轴向震动的机械能。当每个脉冲通过振荡短节后,其恢复到原来的状态。每次脉冲会产生 3 ~ 10 mm 的振幅和一定的轴向力<sup>[8]</sup>。足以将静摩擦力转化为动摩擦力。水力振荡器会产生 4.5 MPa 左右的压降,因为

轴向力和轴向移动距离都不大,水力振荡器在工作期间不会对其他井下工具产生不利影响。其参数规格参见表 1。

表 1 National Oilwell Varco 水力振荡器工具参数

| 工具尺寸/in         | 总长/ft            | 质量/lb | 推荐流量/(gal·min <sup>-1</sup> ) | 温度/°C | 工作频率                    | 压差/psi    | 最大拉力/lb |
|-----------------|------------------|-------|-------------------------------|-------|-------------------------|-----------|---------|
| 3 $\frac{3}{8}$ | 6 $\frac{1}{2}$  | 125   | 90 ~ 140                      | 150   | 26 Hz@ 120 gal/min      | 450 ~ 700 | 184000  |
| 3 $\frac{3}{4}$ | 12 $\frac{1}{2}$ | 240   | 90 ~ 140                      | 150   | 26 Hz@ 120 gal/min      | 500 ~ 700 | 250000  |
| 4 $\frac{3}{4}$ | 9                | 310   | 150 ~ 270                     | 150   | 18 ~ 19 Hz@ 250 gal/min | 500 ~ 650 | 354000  |
| 6 $\frac{3}{4}$ | 9                | 1000  | 400 ~ 600                     | 150   | 16 ~ 17 Hz@ 500 gal/min | 600 ~ 700 | 693000  |
| 8               | 11               | 1600  | 500 ~ 1000                    | 150   | 12 ~ 13 Hz@ 900 gal/min | 600 ~ 700 | 990000  |
| 9 $\frac{5}{8}$ | 12 $\frac{1}{2}$ | 2000  | 600 ~ 1100                    | 150   | 16 Hz@ 900 gal/min      | 500 ~ 700 | 1260000 |

注:1 in = 25.4 mm;1 ft = 12 in = 3048 mm;1 lb = 0.45359237 kg;1 gal(美) = 3.785412 L;1 psi = 6.895 kPa。

### 3 水力振荡器现场使用效果与注意事项

2011 年 5 月,川庆钻探 50672 井队在苏里格气田鄂尔多斯盆地伊陕斜坡苏 5 区块苏 5-3-16H1 井使用 National Oilwell Varco 公司水力振荡器滑动机械钻速提高 100%。并创造了当时国内陆上油田最长水平段 2606 m。同区块的苏 76-1-20H 井水平段进尺 2856 m,刷新了国内陆上最长水平段记录。同时与未使用水力振荡器相比机械钻速提高了 129%。

大庆油田大 165-102-平 106 井在斜井段和水平段使用水力振荡器,从井深 1580 m 钻至 1796 m,井斜从 45°造斜至 89°,进尺 216 m,纯钻时 30 h,平均钻速 7.2 m/h。其中累计定向进尺 173 m,平均定向钻速 7.0 m/h;累计复合进尺 43 m,平均复合钻速 8.4 m/h。与临井大 165-98-平 106 井同井段同型号钻头未使用水力振荡器相比定向钻进机械钻速提高了 59%。

在榆 37-2H 井使用中有效地改善了钻井过程中钻压传递效果并提高了滑动钻速。在上趟钻未使用水力振荡器时,托压现象严重,工具面难以调整,机械钻速较低,使用水力振荡器之后平均滑动机械钻速由 1.94 m/h 提高到了 2.87 m/h,提高幅度达到 47.94%。

2013 年 2 月 8 日 22:30 玉门鸭 K1-7 井组装水力振荡器,钻具组合:Ø216 mm M1665SSD 型钻头 + Ø172 mm 螺杆 + Ø165 mm 回压阀 + Ø165 mm 悬挂短节 + Ø165 mm 无磁钻铤 × 1 根 + Ø165 mm 钻铤 × 5 根 + 6 $\frac{3}{4}$  in (Ø171 mm) 力振荡器 + 6 $\frac{3}{4}$  in (Ø171 mm) 振荡短节 (距钻头约 66 m) + Ø165 mm 钻铤 × 4 根 + Ø127 mm 加重钻杆 × 6 根 + Ø165 mm 随钻震击器 + Ø127 mm 加重钻杆 × 3 根 + Ø127 mm 钻杆。

使用井段 2645.39 ~ 2835 m,累计进尺 189.61 m,纯钻时 111.3 h,综合平均机械钻速 1.7 m/h。其中定向进尺 118.88 m,定向钻进时间 93.2 h,平均定向机械钻速 1.28 m/h;复合进尺 70.73 m,复合钻进时间 18.1 h,复合平均机械钻速 3.9 m/h。全部为造斜钻进,井斜从 6.59°增至 22°(预计井底)。所钻地层白杨河组 E<sub>3b</sub>、中沟组 K<sub>1z</sub> 和下沟组 K<sub>1g</sub>,棕红色泥岩。

对比本井上部没用水力振荡器的相邻井段:2540 ~ 2645.39 m,累计进尺 105.39 m,纯钻时 52.67 h,综合平均机械钻速 1.99 m/h。其中定向进尺 45.69 m,定向时间 37.49 h,平均定向机械钻速 1.21 m/h;复合进尺 59.7 m,复合时间 15.18 h,复合平均机械钻速 3.9 m/h。井斜从 3.0°增至 6.59°。所钻地层白杨河组 E<sub>3b</sub>,棕红色泥岩。

使用水力振荡器后,在井斜增大和地层变硬的情况下,在定向进尺翻一倍的情况下,平均定向机械钻速略有提高,从 1.21 m/h 提高到 1.28 m/h。对解决大井斜的定向托压和钻具粘附稍有改善。

### 4 总结与建议

(1) 水力振荡器通过把静摩擦力转化为动摩擦力的方式来降低摩擦阻力是有效的,在钻井施工过程中可以与常规做法配合使用,比如加入润滑剂和短起下钻等。而且可以通过降低摩阻来减少摆工具面的时间,从而提高纯钻利用率。

(2) 在定向钻井中,井眼状况十分复杂,实现安全快速钻进是一个系统工程,在泥浆方面必要的防粘附措施也一定要跟上,应及时添加足够量的润滑剂。

(下转第 75 页)

钻的效率。另外,钻杆即为主动钻杆,起下钻可直接利用油缸,添加钻杆和拆卸钻杆可直接在动力头顶部分完成,钻杆加卸方便。

(3)搭建工作平台,8个人大约需要1 d时间,拆卸平台只需半天,租赁钢管和扣件的费用每天只需11元人民币。平台上放置400 m绳索取心钻杆及钻具时,平台十分稳固。实践证明,工作平台的建造既快捷又经济,使用既安全又可靠。

## 6 结论

(1)通过对CS1000P6L型钻机的各主要参数的分析,特别是在对钻机动力头部分的结构和原理进行认真研究的基础上,经过野外现场的生产实验,验证了该型钻机在水平钻孔施工中的性能是可靠的。从而证明了该型钻机在 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 的倾角范围内可以实现正常钻进工作。为该机型在岩心钻探施工领域拓展了应用范围,在同行业内具有良好的推广价值和现实意义。

(2)创新思维方式,采用了建筑工程常用的脚手架搭建工作平台,不仅为施工人员提供了安全方便的操作空间,还为钻杆钻具的摆放提供了安全可靠的支撑。工作平台的安装和拆卸十分方便,平台工作面的尺寸可随意扩大或缩小,制作成本低廉。

(3)工作平台与钻机的钻架连接在一起,有效地控制了钻机工作过程中的振动,增加了钻机工作的稳定性。另外,利用脚手架的连接方式,对钻机的钻架在钻孔轴线方向上进行了巧妙的结构支撑,有效地控制了设备与钻架工作过程中在钻孔轴线方向上的位移,增强了钻机在起下钻具时工作的可靠性。

## 参考文献:

- [1] 庞少青,李国东.全液压力头钻机存在的问题分析及改进建议[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(2):64-66.
- [2] 杨付伟,鲁建军.GYD-20型全液压力头工程钻机的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(11):34-36.
- [3] 李增乐.中浅层水平井井眼轨道优化设计与现场施工[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(10):43-45.
- [4] 刘成才,朱发宪.全液压力头钻机的改进建议[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(9):40-41.
- [5] 伍晓龙,刘凡柏,刘智荣.3500m全液压岩心钻机动力头结构设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):13-17.
- [6] 孙友宏,于萍,赵大军,等.JDY-1500型全液压力头岩心钻机的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(S1):43-45.
- [7] 吕冰.ZYW-1200煤矿用全液压钻机动力的设计[J].矿业安全与环保,2010,37(4):51-52,55.
- [8] 臧臣坤,张金昌,冯起赠.全液压力头水井钻机国产化若干问题[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(2):12-15.
- [9] 郑俊华,赵大军,孙友宏,等.JDX-1500型岩心钻机给进与回转液压系统设计[J].工程机械,2008,(8):42-45,77.

(上接第71页)

(3)水力振荡器是首次在鸭儿峡鸭K1-7井使用,在考虑还有1000 m非常长的造斜和稳斜井段,为了确保其使用效果,其位置安放在距钻头约66 m。但是所钻地层白杨河组和中沟组,主要为棕红色泥岩,其对钻铤的粘附作用非常强。建议在以后使用时,缩短其距钻头的安放位置,离钻头越近,其振荡作用越强;或者可以考虑在其上部适当位置再加装另外一套水力振荡器,效果会更好。

(4)从水力振荡器外径来分析:钻铤外径为165 mm,水力振荡器的外径为172 mm,比与其相连接的钻铤外径大7 mm,是否存在支点影响,有待进一步分析研究。以后可考虑选用与钻铤外径相同的水力振荡器或采用其他过渡方式,消除不良影响。

## 参考文献:

- [1] 王吉现.大牛地气田DP31H井钻井难点与对策[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(1):14-18.
- [2] 董志辉,胥豪.长水平段水平井井眼轨道优化设计方法[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(3):35-37,41.
- [3] 易先中,宋顺平,陈霖,等.复杂结构井中钻柱托压效应的研究进展[J].石油机械,2013,(5):100-104.
- [4] 陈勇,蒋祖军,练章华,等.水平井钻井摩擦影响因素分析及减摩技术[J].石油机械,2013,(9):29-32.
- [5] 张辉,吴仲华,蔡文军.水力振荡器的研制及现场试验[J].石油机械,2014,(6):12-15.
- [6] 许越永,黄根炉,王爱国,等.YM7-H1超深水平井施工困难及原因分析[J].石油钻探技术,2005,33(6):12-14.
- [7] 刘华洁,高文金,涂辉,等.一种能有效提高机械钻速的水力振荡器[J].石油机械,2013,(7):46-48.
- [8] Skyles L P, Amiraslani Y A. Converting static friction to drill further and faster in directional holes[R].SPE 151221,2012.
- [9] 王建龙,王丰,张雯琼,等.水力振荡器在复杂结构井中的应用[J].石油机械,2015,(4):54-58.