

# 大位移井钻柱“粘滞—滑动”规律研究<sup>\*</sup>

韩春杰 阎铁

(大庆石油学院)

韩春杰等. 大位移井钻柱“粘滞—滑动”规律研究. 天然气工业, 2004; 24(11): 58~60

**摘要** 文章分析研究了大位移井钻井过程中对钻具破坏很强的一种扭转振动:“粘滞—滑动”,这种振动在大位移井钻井过程中发生的概率比较大,表现为或停或转的状态,转动的瞬间钻头以很大的速度冲出,引起钻头与地层、钻柱与井壁强烈碰撞,因此引起钻具失效。通过建立大位移井钻柱的等效扭转摆模型,分析了在钻头与地层扭矩及钻柱与井壁间摩阻扭矩作用下钻柱的动态行为,给出了钻柱所受摩阻力与钻柱动态位移之间的函数关系。分析了钻柱“粘滞—滑动”振动所遵循的物理规律,获得了大位移井“粘滞—滑动”共振频率的分布。结果表明:大位移井的“粘滞—滑动”现象表现为低频反应。根据“粘滞—滑动”共振所满足的条件,通过调整钻井参数可以避免“粘滞—滑动”现象的发生;扭转负反馈对“粘滞—滑动”现象有一定的阻碍作用。该问题的分析结果具有较高的理论价值和实际意义,对大位移井钻进中如何减少钻具失效问题提供力学依据。

**关键词** 钻井 大位移井 粘滞—滑动 摩擦扭矩 频率

## 一、振动的力学模型

大位移井在钻井中,随着水平位移的加长,大部分钻柱躺在井眼的底边,钻柱与井壁的接触摩阻力很大,转动钻柱需要很大的扭矩。在转盘钻井中,通常钻柱通过地面驱动机构驱动而获得一个固定的转速。钻柱越长,钻柱的扭转刚度越低,钻柱传递扭矩和钻压的能力也随之降低,使得钻柱端部即钻头处产生扭转振动,振动速度约为地面的转速。振动的剧烈程度取决于表面驱动系统的特性、钻头与岩石的相互作用及钻柱与井壁的摩擦。当钻头周期性地粘滞和重新滑动时,产生钻柱的“粘滞—滑动”现象。这种现象被认为是一种使钻井效率下降且常常造成破坏的一种危害性很强的振动,振动相当剧烈,钻柱处于或停或转“粘滞—滑动”的状态,滑动瞬间钻头速度远远超过地面转速,钻头和钻柱承受巨大的动载。此现象最初是研究人员通过对井底的一个测量工具记录的试验数据进行分析后发现的。后来,在试验研究中多次观察到了在现场出现过那类 PDC 钻头牙轮的损坏现象,并且当 PDC 钻头钻遇较硬的岩石而产生滑动的瞬间会产生这种损坏。由于扭转波动很大,严重影响着钻井效率和井下安全,过大的波动扭矩有可能超过设备的扭矩极限,使钻井工程受到阻碍,同时带来巨大的经济损失。

大位移井的定义一般是指井的水平位移与井的垂深之比等于或大于 2 的定向井,也有指侧深与垂深之比的。大位移井最主要的特点是大斜度稳斜段长,且在水平方向上位移大,其测深实际达到了深井、超深井的深度。随着水平位移的增加,钻柱的相对刚度逐渐降低,钻柱就像一根软绳,有时很难克服钻头与地层、钻柱与井壁间的静摩擦扭矩,因此产生钻柱的“粘滞”,随着钻柱顶部的驱动,钻柱积累的能量克服了钻柱的“粘滞”状态以很大的速度冲出,产生钻柱的“滑动”。钻柱的“粘滞—滑动”是由钻头与地层、钻柱与井壁的非线性摩擦引起的,这种非线性摩阻扭矩使钻柱产生钟摆式扭转振动—扭摆。对钻柱的这种振动做如下假设:①可以认为钻柱系统就像一根弹簧,钻柱的质量集中于钻头处;②转盘相当于一个固定边界,认为转盘系统转速保持不变;③由于大位移井钻井液的润滑性能比较好,可忽略泥浆阻力;④忽略钻柱的其他动力行为对这种振动的耦合影响。

图 1 为大位移井钻柱的扭摆模型示意图,其中  $k$  为钻柱的等效扭转刚度,  $N \cdot m/rad$ ;  $J$  为钻柱质量

\* 本文系中国石油天然气集团公司创新基金资助项目,编号:2001cx-2t。

**作者简介:**韩春杰,女,1969年生;1992年毕业于哈尔滨师范大学,获学士学位;2004年毕业于大庆石油学院石油工程学院,获硕士学位;现为大庆石油学院电子工程系教师。地址:(163318)黑龙江省大庆市。电话:(0459)6503366。

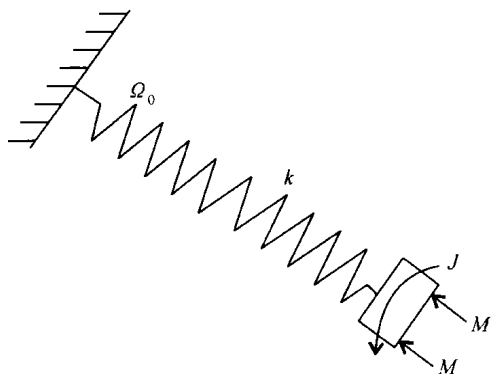


图 1 大位移井钻柱“粘滞—滑动”扭摆模型

惯性矩,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ; 钻柱顶端以  $\Omega_0$  的恒定角速度转动,  $\text{rad/s}$ ;  $M$  为作用在 BHA 上的摩擦扭矩,  $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

井底钻具组合 (BHA) 可以被看作一个受到阻尼的飞轮, 钻头的运动方程为:

$$J\ddot{\theta} = -K(\theta - \Omega_0 t) - M \quad (1)$$

式中:  $K = \frac{GI}{l}$ ,  $G$  为钻杆的剪切模量,  $\text{kPa}$ ;  $I$  为钻柱的截面惯性矩,  $I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$ ,  $\text{cm}^4$ ;  $D$  为钻柱的外径,  $d$  为钻柱的内径;  $l$  为钻柱的长度。

对于摩擦扭矩的情况是:

$$M = M_c \quad \frac{d\theta}{dt} > 0 \quad (2)$$

$$|M| \leq M_c + \Delta M \quad \frac{d\theta}{dt} > 0 \quad (3)$$

$M_c$  为不变的摩擦扭矩;  $\Delta M$  为启动或打破 BHA 粘滞停止所需的额外扭矩<sup>[1]</sup>。

运动方程满足以下边界条件:

$$\begin{cases} \theta|_{t=0} = - (M_c + \Delta M) / K \\ \frac{d\theta}{dt}|_{t=0} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

开始的一段时间内钻头的速度为正, 运动方程写成下列形式:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + K\theta = K\Omega_0 t - M_c \quad (5)$$

满足以上初始条件的方程的解为:

$$\theta(t) = \frac{\Delta M}{K \cos\varphi} \cos(\omega_0 t - \varphi) + \Omega_0 t - \frac{M_c}{K} \quad (6)$$

这里的  $\omega_0$  为无阻尼状态下的角频率:

$$\omega_0 = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{G}{\mu}} \quad (7)$$

式(6)中的  $\varphi$  为相位角:

$$\tan\varphi = \frac{K\Omega_0}{\Delta M\omega_0} = \alpha \quad (8)$$

当角速度 ( $\omega$ ) 的值为零时, 钻头第一次出现停止不动, 此时可以求出钻头滑动的时间 ( $t_1$ ), 粘滞时间内钻头的转速为零, 即:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\omega_0 \Delta M}{K \cos\varphi} \sin(\omega_0 t - \varphi) + \Omega_0 \quad 0 < t < t_1 \quad (9)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = 0 \quad t > t_1 \quad (10)$$

由式(9)可得钻柱的滑动时间 ( $t_1$ ):

$$t_1 = (\pi + 2\varphi) / \omega_0 \quad (11)$$

这时的角位移

$$\theta(t_1) = \Omega_0 t_1 + \frac{(\Delta M - M_c)}{K} \quad (12)$$

当摩擦力扭矩又达到极限时, “粘滞—滑动” 达到了一个周期, 此时:

$$-K[\theta(t_1) - \Omega_0 T] - (M_c + \Delta M) = 0 \quad (13)$$

由式(13)可以求出粘滑周期 ( $T$ ):

$$T = \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi\alpha} + \frac{\tan^{-1}\alpha}{\pi} \right) T_0 \quad (14)$$

式(14)中的  $T_0$  为钻柱扭转自振频率:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad (15)$$

有关“粘滞—滑动”振动的各种函数关系图像如图 2、图 3。

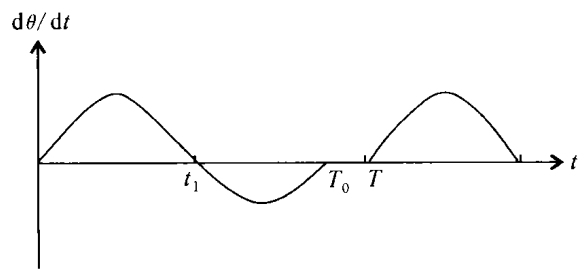


图 2 钻头角速度随时间的变化曲线图

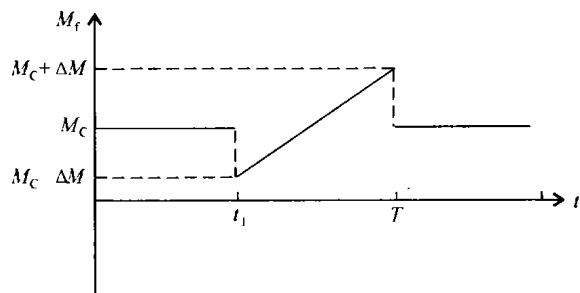


图 3 钻头所受的摩擦扭矩随时间的变化

从图 2 中可以看出, 大位移井钻柱的“粘滞—滑

动”振动的周期大于钻柱的固有周期,也就是说粘滑振动的频率小于钻柱扭转振动的固有频率,表现为低频反映<sup>[2]</sup>。图3表明了钻柱的滑动摩擦扭矩 $M$ 的变化与钻柱的“粘滞—滑动”是同步的<sup>[2]</sup>,当钻头滑动阶段时摩擦扭矩基本为不变值 $M_c$ ,当钻柱头处于粘滞阶段时受到的摩擦力为静摩擦,发生线性的变化,当钻头受到的静摩擦达到最大静摩擦时,钻头扭矩克服静摩擦扭矩后,钻头又开始滑动,完成一次“滑动—粘滞”的过程,当钻头克服了最大静摩擦扭矩后,表现为以很大的速度冲出,会产生严重后果。

## 二、“粘滑”振动的实例分析

以渤海湾 QK17-2-P32H 油田开发的大位移井为例,该井水平位移 3631 m,垂深 1869 m,水垂比 1.94。取钻头以上的一部分为研究对象,水平井段为 127 mm 的加重钻杆,具体的参数如下:钻杆部分的长度  $l=3000$  m;额外扭矩  $\Delta M=4.0$  kN·m;扭转速度  $\Omega=2\pi$  s<sup>-1</sup> (60 r/min);钻柱的转动惯量  $I=6.1\times 10^{-6}$  m<sup>4</sup>;标准速度参数  $a=0.75$ ;扭转刚度  $K=159$  Nm/rad。

根据前面的分析,利用式(14)和(15)得钻柱扭转振动的固有周期( $T_0$ )和粘滑振动的周期( $T$ )分别为 2.2 s 和 3.8 s,“粘滞—滑动”振动的周期大于钻柱的扭转固有振动。图4为利用井底测量仪记录的在有无“粘滞—滑动”情况下井底加速度情况。

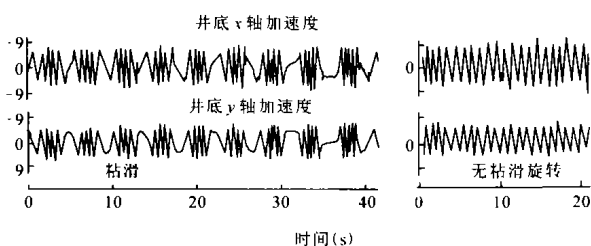


图4 在有无“粘滞—滑动”的情况下井底加速度

如何减小“粘滞—滑动”的共振现象一直是钻井工作者所关心的问题。可通过一些办法减小大位移井钻柱的“粘滞—滑动”振动,比如:由于大位移井钻柱的这种振动表现为低频反映,钻井过程中适当地增加顶部转速可以减小“粘滞—滑动”振动的发生机率;随着大位移井水平位移的加大,钻柱的扭转刚度相对降低,所以,在保证井眼轨迹控制精度和其它各项钻井作业正常进行的条件下,优化钻柱结构,增大其等效扭转刚度可以减小“粘滞—滑动”;在钻头开始旋转时的钻压对“粘滞—滑动”有一定的影响,实

验表明,钻头开始运动时钻压不要过大,因为最大静摩擦力是随着压力的增大而增大,应将钻头先提离井底,然后小心地施加钻压,以便克服钻头启动时钻头所受到的最大静摩擦力<sup>[1]</sup>;由于额外扭矩  $\Delta M$  增大,“粘滞—滑动”的发生机率增大,所以改进钻头设计和降低摩擦系数使额外扭矩减小以减缓“粘滞—滑动”的发生。

在某些情况下,由于受到现场条件和施工要求的限制,上述方法无法实现,人们提出了顶部扭矩负反馈减振方法<sup>[4]</sup>。所谓顶部扭矩负反馈就是根据顶端的扭矩波动情况,事实调整顶部转速,当顶部扭矩大于其平均扭矩时,减小转速;而当顶部扭矩小于其平均扭矩时增大扭矩,转速调整的大小与顶部扭矩和平均扭矩的差值成正比。通过这种顶部扭矩负反馈,可以改变钻柱对扭转振动能量的吸收,从而避免“粘滞—滑动”的发生。

## 三、结论

大位移井钻柱“粘滞—滑动”振动对大位移井钻井作业会产生严重的影响,关系到钻井作业的安全。这种振动和钻柱受到的摩阻扭矩有关,“粘滞—滑动”现象是钻头克服摩阻扭矩的结果。钻柱越长,钻柱的相对刚度越小,“粘滞—滑动”现象越容易发生,优化钻柱结构、井身剖面、合理选择钻井液能有效减少这种振动发生。振动表现为低频反映,所以开始钻井时转速不宜过低,钻压不宜过大。顶部扭转负反馈减振方法虽然有效,但还有待于进一步研究。

## 参考文献

- 1 D H van Camper, Keultjes W J G. Stick-slip whirl interaction in drill string dynamics. *Journal of Vibration and Acoustics*, April 2002; 124
- 2 Halsey G W, Kyllingstad A, Kylling A. Torque feedback used to cure slip-stick motion. *Society of Petroleum Engineers, SPE* 18049
- 3 黄根炉,韩志勇.大位移井钻柱粘滑振动机理分析及减振研究. *石油钻探技术*, 2001; 29(2)
- 4 李克向,周煜辉,苏义脑,徐云英等.国外大位移井钻井技术.北京:石油工业出版社,1998
- 5 杨守忠.一种对付特大井漏的钻进工艺. *石油钻采工艺*, 1995; 17(3)
- 6 王实其,彭大勇,陈兴明.恶性井漏与气层并存的水力强钻技术. *钻采工艺*, 1994; 17(4)
- 7 曾明昌.以强钻处理恶性井漏. *钻采工艺*, 1987; (1)

(收稿日期 2004-06-28 编辑 钟水清)