

一种牙轮脱落预警新技术及其工作理论研究^{*}

杨迎新 林敏 刘德明 杨建忠 朱强

(西南石油学院)

杨迎新等.一种牙轮脱落预警新技术及其工作理论研究.天然气工业,2005;25(7):62~65

摘 要 文章介绍了一种以轴承副的径向磨损量作为轴承工作状态监测参数、以钻头机械钻速和工作扭矩的急剧变化作为预警信号的牙轮脱落预警新技术。新技术利用摩擦自锁原理,将一个预警装置设置在原有牙轮钻头的轴承腔内。当轴承磨损量达到预定的危险界限时,牙轮将被卡死在轴颈上,轴承的磨损过程终止。钻头工作扭矩和机械钻速急剧变化的信号预示钻头轴承寿命的终结,应即时起钻更换钻头。文章阐述了该技术的基本工作原理,建立了钻头轴承副临界磨损量与结构参数之间的解析关系,说明了预警装置的结构设计准则。

主题词 牙轮钻头 牙轮脱落 预警 轴承 磨损 摩擦

牙轮钻头的各种失效形式中后果最为严重的是牙轮脱落。牙轮脱落事故一旦发生,将会给后续的钻井工作带来很大的困难,严重影响钻井进程,增加钻井成本。牙轮脱落的根本原因,在于轴承内牙轮轴向锁定装置的失效,这种情况一般发生在钻头轴承过度磨损的场合。因此,要避免牙轮脱落,必须在牙轮锁定装置失效前将钻头从井中起出。然而,由于井下工况的复杂性以及钻柱的柔性,井场地面操作人员很难准确地判断钻头在井下的磨损状况(深井和小井眼钻井尤其如此)。为了避免掉牙轮事故的发生,实际钻井作业中只好按保守的方法粗略估计钻头寿命,提前起出钻头。这种做法虽然可以减小牙轮脱落的可能性,但却是以钻头工作能力的牺牲或浪费为代价的。尽管如此,由于钻头工作条件的复杂性和特殊性,牙轮脱落事故仍然时有发生。

近年来,国外在这方面已取得了一些新的研究成果^[1~4],其中美国 RBI(Rock Bit International)公司的钢球憋卡预警技术尤其引人注目。

本文介绍西南石油学院岩石破碎学与钻头研究实验室在牙轮防脱落技术领域取得的最新研究成果——一种牙轮脱落预警新技术及其工作理论。

一、新技术的工作原理

简言之,新技术采用的防止牙轮脱落的技术思

路是:当钻头轴承失效或接近失效时,置于钻头轴承腔内的预警装置启动,牙轮被卡死,钻头的机械钻速和工作扭矩会发生显著变化,从而实现向地面发出牙轮脱落预警信号的功能,提示钻台工作人员起出钻头。与此同时,由于牙轮卡死后不再绕轴颈转动,故可避免轴承副磨损状态的加剧。轴承副的磨损量为预警系统的状态监测参量,钻头的机械钻速和工作扭矩的变化为判断钻头轴承是否失效的预警信号。

该技术思想有3个关键点:第一,预警装置必须能够随时监测轴承的磨损量(轴承的径向间隙);第二,预警装置应能在轴承磨损量超过警戒线时及时启动;第三,锁卡牙轮的元件必须具备足够的承载能力,以适应大冲击载荷下卡死牙轮的要求。在本方案中,这三个关键点的实现均利用了一个简单的力学原理——摩擦自锁^[5~7]。因此,摩擦自锁原理是本技术思想的核心内容。

图1是预警装置的结构简图。预警装置由轴颈上的一个周向轨道槽、位于轨道槽起始端的滚动体初始位置槽(以下简称初位槽)、滚动体、锁楔以及锁楔定位件等组成。轨道槽的深度是逐渐变浅的,深度渐浅的方向与牙轮绕牙爪轴颈转动的方向一致(图2、图3)。滚动体是预警装置的启动元件,而锁楔则是预警装置启动后锁卡牙轮的元件。锁楔是一

^{*} 本文受到中国石油天然气集团公司“中青年科技创新基金”资助(资助项目:牙轮防脱落技术研究)。

作者简介: 杨迎新,1964年生,高级工程师,工学博士,四川省高校重点实验室“岩石破碎学与钻头研究实验室”副主任,西南石油学院钻头研究所所长;从事油气井钻头和井下工具研究。地址:(637001)四川省南充市西南石油学院钻头研究所。电话:(0817)2642922。E-mail:yang2547@sina.com

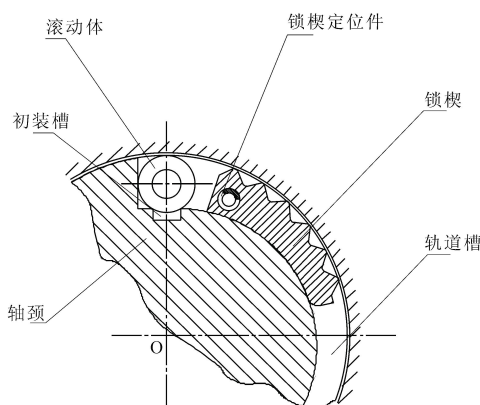


图1 预警装置结构简图

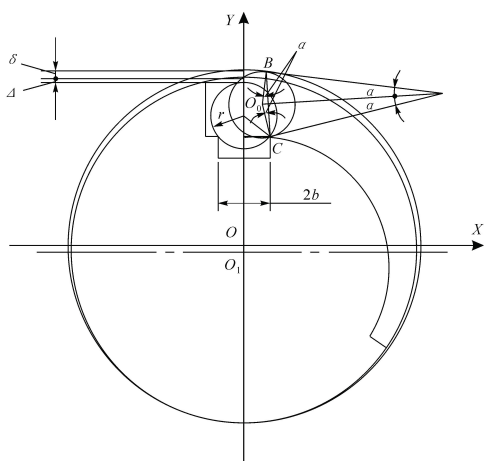


图2 滚动体启动状态示意图

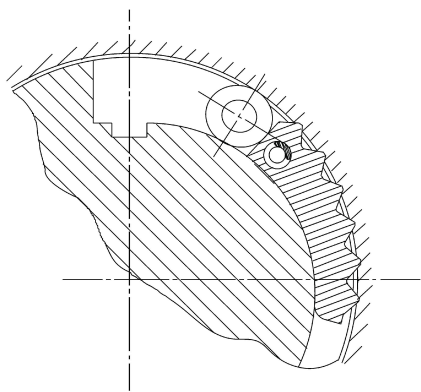


图3 锁楔锁卡工作状态示意图

工成有若干个齿的表面。在预警装置启动之前,滚动体和锁楔不对轴承的运转产生任何影响。

在新钻头开始工作时,轴承间隙很小,随着钻头的振动,滚动体会上下左右小幅跳动。在滚动体的跳动过程中,会经常出现滚动体与轨道槽的起始点C(图2中的初位槽边缘)以及牙轮内孔同时接触的情况,但此时接触状况不满足摩擦自锁条件,滚动体会很快脱离此状况回到初位槽中。随着轴承副磨损量的逐步增大,轴承副之间的间隙越来越大,滚动体的跳动幅度也随之增加。当磨损量达到一定限值(预警磨损量)时,一旦滚动体运动到与轨道的起始点C以及牙轮内孔同时接触的位置,摩擦自锁条件成立,滚动体将无法回到初位槽,而是进入轨道槽并沿轨道滚动。滚动体运动至与锁楔相接触时,施加在锁楔上的力逐渐增大,直至使锁楔初始定位失效,滚动体推动锁楔沿轨道滑动,使锁楔的上部表面与牙轮内孔相接触。由于轨道的深度是逐渐变浅的,轨道各处均满足摩擦自锁条件,且锁楔的上部工作面与牙轮内孔之间的摩擦阻力大于锁楔的下部工作面与轨道底面之间的摩擦阻力,故锁楔将在牙轮与轴颈的相对转动过程中随牙轮一起运动。随着锁楔向轨道槽狭窄方向的运动,锁楔与牙轮内孔以及轴颈轨道之间的作用力逐渐增加,锁楔的上部工作面将逐渐吃入牙轮孔壁(图3),牙轮转动的阻力也越来越大,最终牙轮将被卡死在轴颈上,不再绕轴颈转动。此时,轴承副的磨损随之停止,同时钻头的工作扭矩显著增大,机械钻速显著降低(在软地层中,牙轮刚卡死时,钻头可能依赖牙齿对岩石的刮切作用而使钻头保持一定的机械钻速,但随着牙齿的迅速磨损,钻头的钻速仍将显著降低),钻台工作人员即可根据此报警信号判定钻头轴承已失效,及时起出并更换钻头。

二、临界磨损量与结构参数的关系

预警装置的自激启动,主要是利用了滚动体与初位槽边缘以及牙轮内孔同时接触时的摩擦自锁原理,使滚动体能够适时地进入轨道槽。

如图2所示,设处于初位槽内初始位置的滚动体的上部最高点与轴颈圆柱面的距离为 Δ ($\Delta=0$ 时即齐平或相切)。以已磨损的牙轮内孔中心为坐标原点,建立直角坐标系 XOY 。牙爪轴颈中心为 O_1 ;C为轴颈轨道起始点,其坐标为 (x_c, y_c) ;滚动体与牙轮内孔、C点同时接触时,其圆心 O_0 的坐标为 (x_0, y_0) , O_0 至坐标原点的距离为 R_0 。

个从一端至另一端厚度逐渐变小的曲面楔形物,安装在与轨道槽起始端相距适当距离处,由定位元件固定在初始位置上。锁楔装入轨道槽后,其下部工作面与轨道槽的底面相接触。锁楔上部工作面的形状与牙轮内孔表面相适应,下部工作面的形状与轴颈轨道槽底面相适应。上部工作面可以是光滑曲面,也可以是粗糙曲面(如滚花加工面等),还可以加

滚动体在与牙轮内孔相切,且通过初位槽初始点 C ,故滚动体圆心 O_0 的坐标 (x_0, y_0) 以及切点 B 的坐标 (x, y) 满足如下方程组:

$$\begin{cases} (x_c - x_0)^2 + (y_c - y_0)^2 = r^2 \\ x_0^2 + y_0^2 = (R_1 - r)^2 = R_0^2 \\ x = \frac{R_1}{R_1 - r} x_0 \\ y = \frac{R_1}{R_1 - r} y_0 \end{cases} \quad (1)$$

求解该方程组,得到

$$\begin{cases} x = \frac{R_1}{R_1 - r} \sqrt{R_0^2 - y_0^2} \\ y = \frac{R_1}{R_1 - r} \frac{2Dy_c + P}{2R_c^2} \end{cases} \quad (2)$$

根据滚动体与轨道初始点以及牙轮内孔同时接触时的几何关系,有:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = (2r2\cos\alpha)^2 \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),得:

$$\cos\alpha = \frac{1}{2r} \sqrt{R_1^2 + R_c^2 - 2x_c k \sqrt{R_0^2 - S^2} - 2y_c k S} \quad (4)$$

$$\text{其中: } S = \frac{Dy_c + \sqrt{D^2 y_c^2 - R_c^2 (D^2 - R_0^2 x_c^2)}}{R_c^2}$$

$$\begin{cases} R_1 = R + \delta; R_0 = R_1 - r; \\ R_c = \sqrt{x_c^2 + y_c^2}; x_c = b; \\ y_c = R_1 - r - \sqrt{r^2 - b^2} - 2\delta - \Delta; \\ D = \frac{R_0^2 + R_c^2 - r^2}{2}; k = \frac{R_1}{r_1 - r} \end{cases} \quad (5)$$

式中: R 为牙爪轴颈的半径, R_1 为磨损后的牙轮半径, r 为滚动体半径, b 为初位槽的半宽, δ 为牙轮内孔半径的磨损量, Δ 为牙爪轴颈半径的磨损量。

在式(4)中,令 $\alpha = \alpha$ (α 为滚动体与牙轮内孔及轨道底面接触副的静摩擦角),即可得到轴承副的临界间隙(在忽略轴承副初始间隙时,临界间隙就是钻头轴承的预警磨损量)与预警装置结构参数的基本关系式。

三、预警装置的结构设计准则

1. 滚动体与初位槽

滚动体的半径和初位槽的宽度是对轴承副的临界间隙(或预警磨损量)影响最大的两个参量。在确定了轴颈轨道的起始深度以及轴承副的临界间隙(或预警磨损量)后,滚动体半径 r 与初位槽宽度 $2b$ 的匹配,应满足以下准则:当滚动体与轨道起始点 C

以及磨损后的牙轮内孔同时接触时,二接触点连线(BC)与接触点法线(BO_0 、 CO_0)之间的夹角为接触副的静摩擦角(α)。也即滚动体半径 r 与初位槽宽度 $2b$ 必须根据方程(4)(令 $\alpha = \alpha$)合理地计算、匹配。

2. 锁楔与轨道槽

要使锁楔实现憋卡牙轮的功能,轨道槽的深度变化率以及锁楔的厚度变化率必须满足特定的条件。该条件是:锁楔在轨道槽底面和牙轮内孔孔壁的压持作用下不会向外滑出,即满足摩擦自锁条件。具体对轨道槽而言,在轨道的任意位置处(图4), AO_0 、 BO_0 与 AB 之间的夹角 α 应小于锁楔上下二接触副的静摩擦角 (O_0 为轨道工作面与牙轮内孔孔壁之间的内切圆的圆心, A 、 B 为切点)。

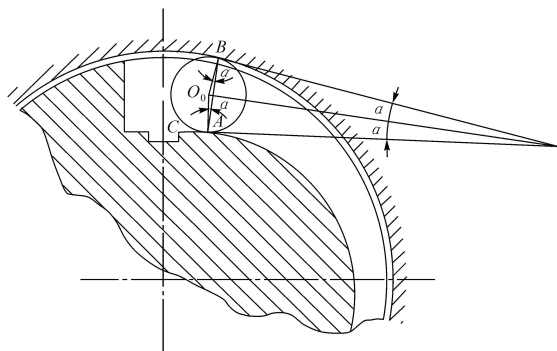


图4 轨道槽结构设计准则示意图

锁楔的上工作面与牙轮内孔相适应,下工作面与轨道工作面相适应,故轨道槽的结构参数确定后,锁楔的主要结构也就随之确定了。

四、结 论

本文提出的牙轮脱落预警技术具有以下优点。

(1)预警方式简单、可靠,易于识别,既能防止牙轮脱落,又避免了过早起出钻头,从而使钻头充分发挥破岩的潜能,减少不必要的起、下钻,有利于降低钻井成本。

(2)能够限制轴承的磨损量,当轴承的磨损量达到临界磨损量时,预警装置启动,牙轮被憋卡在轴颈上,不再绕轴颈转动,因此可以有效地避免轴承的进一步磨损。由于轴承的最大允许磨损量小于可能使锁紧钢球脱出的轴承间隙,故原有的锁紧钢球足以保证牙轮不脱落。

(3)由于预警装置限制了轴承副的最大磨损量,故原有的锁定钢球的直径有可能减小,相应地,轴颈

滚珠槽及牙轮滚珠槽的宽度和深度均可减小,有利于增大轴承的承载面积,提高牙轮壳体的强度。我们已经完成了针对这种新技术的一系列准静态模拟试验和全钻头、单个牙轮钻进时的动态模拟试验。试验结果表明,该技术原理不仅是可行的、成功的,而且具有相当高的可靠性,预警装置的承载能力强,完全能够适应大钻压甚至超大钻压下的预警要求。

该项新技术已经获得使用中国专利授权。专利名称:具有防牙轮脱落预警装置的牙轮钻头。专利号:03233419.2。

参 考 文 献

1 杨迎新,朱强,刘德明等.预警——牙轮防脱落技术的发展方向.西南石油学院学报,2002;(4)

- 2 Pearce D E. A new rock bit bearing provides superior cone retention. IADC/SPE 19909
- 3 Jeffery E, Patsy N. Threaded ring retention mechanism. United States Patent, January 24, 1995
- 4 Roy D. Rock bit cone lock and method. United States Patent, March 15, 1988
- 5 黄安基.理论力学(上册).北京:人民教育出版社,1981
- 6 李继东.石油钻采设备及工艺概论.山东东营:石油大学出版社,1992
- 7 黄靖远等.链环式超越离合器的工作原理和物理本质.中国机械工程,1997;8(1)

(收稿日期 2005-03-03 编辑 钟水清)