

机械式自动垂钻工具粘滑振动抑制方法研究

张 龙^{1,2}, 张 凯^{1,2}, 周 琴^{1,2}, 李国民^{1,2}, 刘宝林^{1,2}

(1.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083; 2.自然资源部深部地质钻探技术重点实验室,北京 100083)

摘要:机械式自动垂钻工具具有耐温性高、成本低、适用范围广等优点,是一种适用于深井和超深井控制井斜、提高垂直精度的重要技术手段。但由于其纠斜、防斜是靠重力及机械结构来实现的,在粘滑振动的工况下工作精度会受到巨大的影响。因此,本文从粘滑振动的产生机理出发,总结出具体影响因素,并对现有国内外抑制粘滑振动的手段进行对比分析,寻求适用于机械式自动垂直钻具的可行粘滑振动抑制方法,为工具防斜纠斜能力的进一步提升提供可靠的技术保障。

关键词:垂直钻井;机械式垂钻工具;纠斜;粘滑振动;抑制方法

中图分类号:P634;TE245 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)11-0043-07

Stick-slip vibration suppression method for mechanical automatic vertical drilling tools

ZHANG Long^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2}, ZHOU Qin^{1,2}, LI Guomin^{1,2}, LIU Baolin^{1,2}

(1.School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2.Key Laboratory of Deep Geodrilling Technology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: Mechanical automatic vertical drilling tools provide the advantages of high temperature resistance, low cost, wide application range, etc.; however, since the deviation correction and deviation prevention are realized by the gravitational and mechanical structure, the working accuracy under the condition of stick-slip vibration is greatly affected. This paper, with introduction to the stick-slip vibration mechanism, summarizes its concrete influence factors, and compares the existing methods to limit stick-slip vibration at home and abroad to explore suitable stick-slip vibration suppression methods for the mechanical automatic vertical drilling tools so as to provide reliable technical support for improvement of deviation prevention and correction capability.

Key words: vertical drilling; mechanical vertical drilling tool; correction; stick-slip vibration; suppression method

“十三五”期间,我国将“三深一土”科技创新发展为主攻方向。其中深地探测战略的目标之一就是储备一批 5000 m 以深资源勘查前沿技术。而深井超深井钻井是一项复杂的系统工程,井温梯度和压力梯度高、井壁稳定性条件复杂、深部地层岩石可钻性差、钻机负荷大等一系列问题在经济和技术上会有很大的风险性。在进行深井垂直钻井中,如何控制井斜、提高垂直精度成为垂直钻井工程中的一个

重点问题。

针对纠斜问题,传统的防斜技术虽然可以起到一定的纠斜效果,但其牺牲了钻压和钻速而且使施工时间加长,远不足以运用到深井作业当中^[1]。VertiTrak 系统、Power-V 系统等一些自动垂直钻井系统^[2]能够在深井钻探中发挥出很好的效果,但是这些系统内部均有大量且复杂的电子控制系统,这些电子元件不耐高温、振动,面对深井中的恶劣环

收稿日期:2019-04-10; 修回日期:2019-07-04 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.11.008

基金项目:国家重点研发计划项目“5000 米智能钻探技术装备研发及应用示范”之“智能地质钻探技术及装备仪器研制”(编号:2018YFC0603405);战略性国际科技创新合作重点专项“多金属矿岩心钻探关键技术装备联合研发及示范”(编号:2016YFE0202200)

作者简介:张龙,男,汉族,1996 年生,硕士研究生在读,主要从事地质工程垂直钻井的研究,北京市海淀区学院路 29 号,2281933143@qq.com。

通信作者:张凯,男,汉族,1989 年生,实验员,博士,主要从事超硬材料在地质工程中的应用、岩石破碎机理与碎岩工具、井下工具研发方面的研究,北京市海淀区学院路 29 号,zhangkai66@cugb.edu.cn

引用格式:张龙,张凯,周琴,等.机械式自动垂钻工具粘滑振动抑制方法研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(11):43-49.

ZHANG Long, ZHANG Kai, ZHOU Qin, et al. Stick-slip vibration suppression method for mechanical automatic vertical drilling tools[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(11):43-49.

境极易发生损坏,导致钻井成本急剧加大。而机械式自动垂钻的出现很好地解决了这类问题^[3],其耐温性高、成本低、适用性广成为了针对深井垂直钻井的又一选择。与电子控制式相比,它的机械结构和纠斜原理都较为简单。Scout Downhole 公司设计出的 Vertical Scout,在偏重机构受到重力影响时,偏重块转至井眼低边,在盘阀的配合下连通钻井液流道,使高压钻井液流入位于井眼高边的活塞腔体中,以此提供推靠力,完成纠斜。哈里伯顿推出的 V-pilot 系统,在井斜发生时钟摆总成在重力的作用下,使钻井液流道打开,涌进的高压钻井液经过阀门总成内部的螺旋形流道,将位于井眼高边一侧的活塞推出完成纠斜。此外还有哈里伯顿研制的 Ver-tiSteer,以及国内中国石化胜利钻井研究院设计的 UPC-VDS 垂钻系统。但机械式垂钻控制精度相对较低、且受振动影响较大,严重影响了其纠斜效果,而随着钻进深度加大,粘滑振动越来越显著,底部钻具的粘滑振动会严重影响垂直钻具工作的稳定性,使纠斜效果恶化。

针对这种情况,本文基于机械式自动垂钻纠斜的原理,以及影响粘滑振动的主要因素,对如今几种抑制粘滑振动的方法与机械式自动垂钻的契合度进行研究,并进行了相关展望。

1 机械式自动垂钻纠斜原理

自动垂直钻具包括电子控制式和机械式自动垂直钻具两大类^[4]。机械式自动垂钻技术是在电子控制式的基础上研究得来的,对于现今主流的机械式自动式垂钻钻具,其工作方式大多数都通过机械结构实现在重力作用下完成纠斜的。

机械式垂直钻具通常都包括重力感应机构和执行机构,其中重力感应机构包括偏重块以及上下盘阀。偏重块在轴承作用下可自由转动,其底部与上盘阀刚性连接并保持同步旋转,上盘阀有一个开孔,其位置与偏重块呈对位分布,下盘阀有多个开孔,分别与下部钻井液流道相连,当重力机构感应到井斜时,偏重块摆动至井眼低边,此时上盘阀开口摆至井眼高边并连通该侧流道,钻井液通过流道进入推靠机构,在压力差的作用下,将对应位置的活塞推至井壁(见图1)。在反作用力的影响下,钻头会加剧对井眼低边的切削,井眼轨迹逐渐回复到垂直位置^[5]。

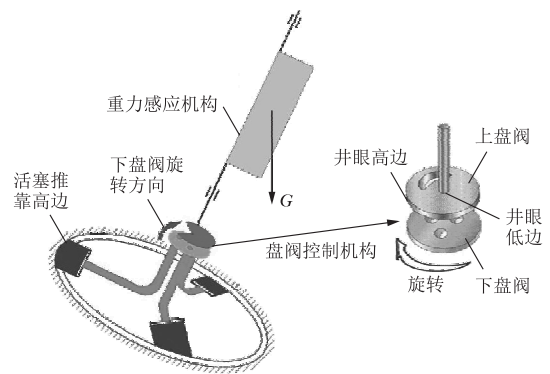


图1 机械式垂直钻具重力感应纠斜机构^[5]

Fig.1 Mechanical vertical drilling tool with the gravity sensor

通过对纠斜原理的分析可以看出,机械式垂钻工具的纠斜精度与偏重块能否快速稳定的转动到井眼低边位置以及推靠机构能否可以及时推出活塞进行纠斜有着密切的关系。但随着钻进深度的不断增加,岩石强度变大、可钻性变差,钻头击碎岩石所需的能量变大;另外,钻柱也随之越来越长,管柱刚度变小^[6]。井底粘滑振动趋于剧烈,粘滑振动会使底部钻具出现卡滑的现象,势必会影响偏重机构位于井眼低边位置的稳定性,以及推靠块推靠井壁时纠斜力的稳定,使其纠斜效果降低。

2 粘滑振动影响机理分析

粘滑振动发生时,转盘转动为钻柱系统提供能量,当输入能量不足以打破钻头与岩层间的摩擦扭矩时,钻头静止处于粘滞状态。此时钻柱扭曲并积蓄能量,直到足够克服摩擦扭矩,钻头以数倍于转盘转速转动进入滑脱状态。之后钻头的摩擦扭矩、钻井液和钻柱系统的阻尼力等都会消耗能量,使钻头再次处于粘滞状态,并进入高速运动和粘滞静止运动相互交替的周期性运动,国内外学者对引起粘滑振动的主要因素进行了大量研究工作。

由粘滑振动的定义可得,钻头的摩擦扭矩会对粘滑振动起到重要的影响。Dawson^[7]、VAN DE VRANDE^[8]通过建立模型发现减小摩擦阻力可以抑制粘滑振动产生;南旭东^[9]、吕苗荣^[10]、汤历平^[6]等得出钻头和钻柱在井底和井壁间是介于动摩擦和静摩擦之间的一种非线性接触,动、静摩擦系数也会对粘滑振动产生影响。由于钻头结构的改变会使其摩擦扭矩也发生改变,Thomas Richard^[11]考虑了在钻头破岩的过程中,钻头与岩石间的相互作用并建立了钻头为集中的质量模型(见图2)。Christophe

Germy^[12]基于图 2 模型并对其进行完善,得到粘滑振动的产生与钻头结构有关。刘清友等^[13]利用弹性杆理论和单元法,进一步了解了牙轮钻头和钻柱在粘滑振动发生时的实际运动规律;张晓东等^[14]对钻头与岩石两者间的摩擦力进行描述,使用能量法对钻柱粘滑振动的稳定性进行了分析。

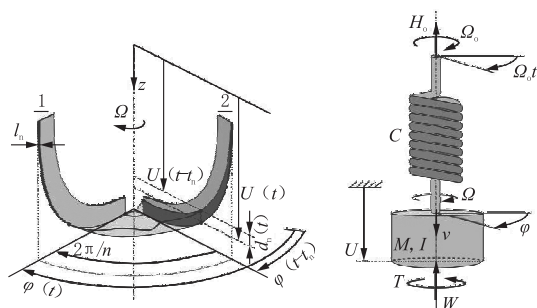


图 2 钻柱系统简化模型^[11]

Fig.2 Simplified model of the drill string system

由于钻头在粘滞状态下,转盘转动为驱动扭矩,因此钻头运动状态的改变与转盘转速之间有很大的关系。Jansen J D 和 Steen L^[15]将钻柱系统简化为线性弹簧,并建立钻头的运动微分方程,分析在破岩过程中扭矩和角速度的波动,发现当转盘转速高于某临界值时粘滑振动将消失。Lin、Dareing、Gulyaev、牟海维等^[16-19]研究得出转盘转速的提高有助于粘滑振动的抑制。

钻头处的钻压是摩擦扭矩产生的必要因素,钻头所受钻压越大,钻头的摩擦扭矩也会相应变大,所以针对钻压与粘滑振动间的关系,AZADI SASSAN 等^[20]通过建立两个自由度钻柱系统力学模型并进行动态仿真模拟,证实了通过改变钻压可以降低甚至消除粘滑振动的影响,从而设计出了一种粘滑补偿器。HUANG、冯程宝、付蒙、张焱、吕苗荣等^[21-24,10],都基于动力学模型发现低钻压可有效避免粘滑振动的发生。

此外,对机械式自动垂直钻具,粘滑振动的振幅和周期更会给偏重机构和推靠装置造成很大的影响^[5],其中偏重块会由简单的衰减运动,变为复杂的钟摆运动,影响纠斜精度;推靠装置由于粘滑振动的运动方式,会降低其有效推靠力,降低纠斜效率。

3 抑制方法分析

抑制粘滑振动的影响是提高机械式垂钻的纠斜精度主要方法之一。通过对纠斜原理与产生粘滑振

动的主要因素的研究可以发现,通过改变某些钻井参数、优化钻头结构等方法,提高钻头破岩时的相对工作扭矩,可以起到抑制甚至消除粘滑振动的效果。目前,出现了多种控制粘滑振动的方法,笔者依据抑制机理将其分成 4 个方面,并依次针对是否适用于机械式垂直钻具进行分析:(1)基于钻井参数的优化;(2)钻头结构的优化;(3)增加额外破岩工具;(4)钻柱内部的结构优化。

3.1 基于钻井参数优化的设计

在钻头处于粘滞状态时,需要钻柱从转盘积攒足够的扭矩,以此克服岩石的阻碍,打破粘滞状态,此时粘滞阶段时间有 $t = T/k_T\omega_0$ (其中: ω_0 为转盘转速, k 为钻柱扭转刚度, T 为破岩所需扭矩^[25]),由此可以看出,增加转盘转速可以减少粘滞时间,抑制粘滑振动。在此基础上 Navarro^[26]在 2009 年提出,可以通过比例积分来控制转盘转速,从而调整出现粘滑振动时的阻尼频率,以此来抑制粘滑振动。井口比例积分控制通常在井口处通过比例积分(PI)来判断钻头处粘滑振动的严重性从而调节转盘转速以此来抑制粘滑振动。Abdulgalil 和 Sigurdjane^[27]通过建立钻柱的集中质量摆模型,设计出了粘滑振动补偿控制与比例积分控制相结合的非线性控制系统。由荷兰公司 Electropject 发明的 EPST 顶驱软扭矩系统已于 2011 年安装并开始使用,通过 PLC 控制转盘转速,从而抑制井底的粘滑振动。由美国 NOV 公司研制的 Softspeed II,它可以广泛的应用不同类型的钻井作业中,包括深井、超深井。因为钻柱产生的振动会由波的形式传递到顶驱,而顶驱会将这些能量反弹回去,这也就导致了粘滑振动的加强,而 Softspeed II 可以通过控制顶驱的转速将通过钻柱传递到地面的振动波吸收,并反射小部分能量^[28]。在经过反复几次之后,扭转振动得到抑制,钻柱趋于稳定,这是一个相消干涉的过程。

国内四川宏华石油设备有限公司、大庆景宏钻采技术开发有限公司等公司都相继开发出了自己的顶驱扭矩系统,其中景宏顶驱配置的转速扭矩控制钻井系统,可以自主选择开闭,并采用双 PLC 结构控制系统,提高了在复杂井况下的安全性。其软扭矩技术,可以自动识别工况,调整输出扭矩,有效降低粘滑运动的发生率。自 2009 年起,大庆景宏钻采技术开发有限公司在美国、加拿大等地都有了一定

的市场,并在可靠性和安全性方面达到世界一流水平。

钻头的摩擦扭矩与钻压成正比,在保证其他钻井参数不变的情况下,通过降低钻压可以达到降低钻头摩擦扭矩从而抑制粘滑振动的产生。MONTEIRO 和 TRINDADE^[29]在2016年,设计出了比例积分和动态钻压控制相结合的方法,并通过比较发现,比例积分和动态钻压相结合的方法可以很有效地控制粘滑振动的现象。一方面通过比例积分调节转盘转速,使之接近目标转速,另一方面通过动态钻压调节,使波动的钻压可以稳定在一个目标钻压上(见图3)。这种方法通过井口收集到的波动情况,经过 PLC 进行闭环精确控制钻压与转速使粘滑振动得到抑制。

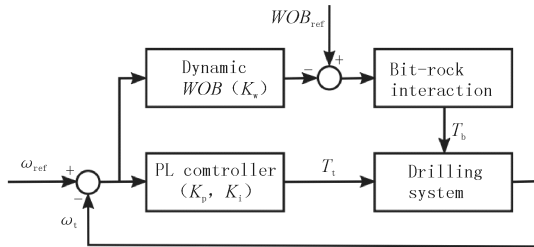


图3 PI调节和动态钻压相结合的系统^[29]

Fig.3 PI angular velocity control scheme with dynamic weight-on-bit (WOB)

这些方法通过实时控制钻压或转盘转速来控制粘滑振动的发生,抑制效果出众,但控制系统复杂,可操作性不强^[30],而且多数都只考虑了钻头与岩层间的相互作用,未考虑钻柱参数变化的影响,随着钻井深度的增加,钻柱的刚度也会随之降低,粘滑振动的发生率也会提高。而软扭矩系统多数适用于低转速钻进,在深井、超深井中运用,其抑制效果会大打折扣,所以这类方法能否在深井、超深井中运用仍需进一步深入研究。

3.2 基于钻头结构的优化设计

钻头存在摩擦扭矩是钻柱产生粘滑振动的必要条件,所以适当降低钻头处摩擦扭矩,可以更直接地降低粘滑振动发生的概率。借助由 KARNOPP^[31]在1990年提出的摩擦系数模型,可以求得钻头滑动摩擦扭矩 $\mu_K W_B \bar{R}_B$, 最大静摩擦扭矩 $\mu_S W_B \bar{R}_B$, 其中 W_B 为钻压、 \bar{R}_B 为钻头等效力臂长度、 μ_K 为动摩擦系数、 μ_S 为静摩擦系数。由此可以看出,钻头摩擦扭矩与钻头-岩石间的摩擦系数成正相关,可以通过优化钻头的结构,起到抑制粘滑振动的效果。而

传统 PDC 钻头具有工作可靠性高、破岩能耗低等优点,但在面对硬质、高研磨性地层时,适应性较差,且 PDC 受振动的影响较其他类型钻头更大。而牙轮钻头虽然对地层的适应性较好,但在塑性地层中机械钻速较低,且牙轮钻头转速不能太高^[32]。Pessier 和 Damschen^[33]提出了将两种钻头混合,复合钻头孕育而生。

复合钻头通过改变常规钻头的齿形,将牙轮钻头与 PDC 刀翼钻头结合,通过改善钻头的工作性能,降低摩擦扭矩,提高破岩效率。由贝克休斯在2010年开发出 kymera 组合式钻头,这种复合钻头有2种类型,由双刀翼双牙轮钻头组成,以及三牙轮三刀翼组成^[25],这种钻头集合了牙轮钻头的攻击性高和 PDC 切削齿清洁岩屑的优势,牙轮钻头先对岩石进行预破碎,之后再由 PDC 刀翼钻头对其进行切削,这样可以降低钻头破岩时的摩擦扭矩,从而获得更高的机械转速(见图4)。两类复合钻头都已通过实钻测试,验证了复合钻头比常规 PDC 钻头更有利于钻井效率的提高,也可以减少井底由振动产生的损伤。

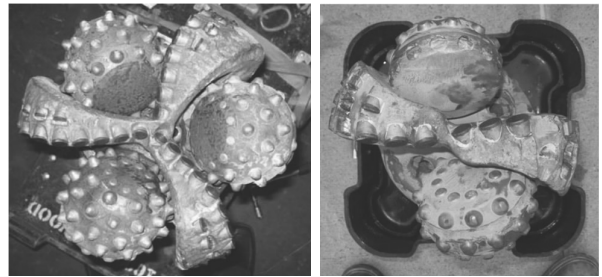


图4 实地测试之后的2种复合钻头^[33]

Fig.4 Field testing of the two types of PDC bits

NOV 公司推出的 Speed Drill 钻头是一种双直径 PDC 钻头,由一个较小的定向钻头和同心扩眼钻头组成。前面导向钻头快速钻进,减小围岩中的应力,扩眼钻头以同样的速度钻穿岩石。该钻头有助于改善钻进稳定性,从而减少震动失效,延长钻头寿命,提高井眼质量,节约钻井成本,经实验测得机械速率提高了 20%^[34]。

由中国石油集团资助,研发的 PDC+牙轮复合钻头于2013年成功在四川麻 002-H1 井下井试验,钻头工作稳定性优于常规 PDC 钻头,且机械钻速提高了 20%。由西南石油大学钻头研究所设计的“4+2”和“2+2”型 PDC-牙轮复合钻头在冀东油田中机械钻速提高了 30%^[35]。

另一方面, Schell^[36]设计了一种在主刀翼中间设置辅助刀翼, 以此避免切削齿吃入量过大, 而引起粘滑振动。Jaggi、Davis 等^[37-38]都由齿钻吃入量对粘滑振动的影响入手, 提出应在钻头上设计出防止吃入量过深的装置。这也揭示了通过优化钻头结构从而控制钻头的切削深度, 也可以有效地抑制粘滑振动。美国贝克休斯公司研制了具有抑制粘滑振动的创新性技术的 TerrAdapt 自适应钻头^[39]。在实际钻井中, 难免会碰到地层性质不相同的情况, 传统 PDC 钻头不能确保钻头进入软地层时的 ROP, 同时又能保证在进入硬地层时不发生粘滑振动。而自适应钻头的出现, 很好地解决了这类问题。TerrAdapt 钻头的工作机理就是不同类型的地层中通过改变钻头的切削深度, 从而抑制粘滑振动。它通过钻头进入不同地层时压力的突然改变, 使液体压力随之改变, 从而控制推靠块的推出深度, 达到实时改变钻齿的切削深度, 降低了钻头处摩擦扭矩, 进而实时抑制粘滑振动的产生^[40]。在 Oklahoma 油田进行的实钻测试证实自适应 PDC 钻头可以在高钻压、低转速的情况下高效钻进, 而且还可以有效抑制粘滑、减轻钻头损坏程度、降低钻井成本。

通过优化钻头结构, 改变钻进方式, 可以很好地降低摩擦扭矩, 抑制粘滑振动。与自适应钻头相比, 复合钻头虽然不具备很强的地层适应性, 在高钻压下钻进时也会使复合片受到强大冲击, 对其使用寿命产生影响, 但复合钻头中没有电子元件, 在今后可以与机械式自动垂直钻具开展更多的适用性研究。自适应钻头抑制粘滑振动效果出众, 但工作原理复杂、成本高, 与机械式垂直钻具并不相匹配, 但与电子式自动垂直钻具相结合, 有很好的发展前景。

3.3 基于提高额外工作扭矩的设计

粘滑振动的产生主要是由于驱动扭矩不能克服地层的摩阻而导致的。在驱动扭矩不足的情况下, 可以等待钻柱积蓄足够的能量, 还可以借助外力的冲击扭矩, 打破粘滞状态, 消除粘滑振动。从吕苗荣等^[10]分析的钻头岩石摩擦力矩分析中可知, 由粘滞阶段钻头所受驱动扭矩与摩擦扭矩平衡, 此时如果引入一个额外冲击扭矩, 方可打破粘滞状态。借助此机理一些辅助破岩工具相继出现, 这些辅助工具意在通过给钻头提供辅助扭矩, 从而间接地增加了钻头的工作扭矩。由 Ulterra 公司研发的 Tork-Buster 是一种纯机械的扭转冲击动力工具, 其原理

为在钻头上方增加一个可以将钻井液能量转化为一种直接施加到 PDC 钻头上的一个高频、低副的扭力冲击, 从而消除 PDC 钻头粘滑现象^[41]。当钻头处于粘滞状态时, TorkBuster 会直接提供给钻头额外扭矩, 不需等待钻头积攒到足够打破钻头与岩石的摩擦扭矩, 钻头就会脱离粘滞状态。因此钻头也不会因积攒的扭矩突然释放而进入滑脱状态, 从而大大消除了粘滑状态的发生。2009 年开始, 我国开始使用 TorkBuster, 在平均机械速率与钻井成本方面都得到了很大的改善。国内由胜利油田研制开发的 SLTIT 型扭转冲击钻井提速工具, 已于 2011 年下井测试, 与普通钻井相比机械钻速平均提高了 50%, 且钻机振动减轻、噪声减小^[42]。

对于此类辅助性破岩工具, 其优点在于装置不含电子元件, 适用性广, 形成的扭转冲击可以直接传至钻头, 减少冲击损失, 也可以有效地抑制粘滑振动的发生。但这种破岩工具所带来的额外冲击扭矩, 会加剧钻头的磨损, 降低其使用寿命。对于机械式垂直钻具的偏重机构可能会使其偏重块不能稳定在井眼低边, 从而影响纠斜效果。如何在增加额外冲击扭矩的情况下, 减少对钻头的磨损、保证偏重平台的稳定性将是下一步研究的关键。

3.4 机械式垂钻工具优化设计

从机械式垂直钻具纠斜原理可以看出, 发生粘滑振动时, 偏重平台机构所受影响最为严重。因此, 针对降低偏重机构的摩阻进行优化, 也可以降低其纠斜效果在外界振动情况下的影响。李立鑫^[5]针对凸台盘阀进行优化, 并在盘阀安装轴上增设单向水力涡轮。对于常规盘阀, 上下盘阀为完全接触, 摩阻较大, 受振动影响明显, 对此在上下盘阀间镶嵌 PDC 复合片, 复合片的端面高出盘阀, 这样优化可以减少盘阀间的接触面积, 摩擦阻力矩明显降低。在粘滑振动的作用下, 偏重块会在井眼低边位置发生摆动, 在盘阀安装轴上增设单向水力涡轮, 在钻井液的稳定排量下, 涡轮产生近似恒定的扭矩, 并传递给盘阀, 可以抵消盘阀的部分摩擦阻力矩, 进而降低偏重块与井眼低边位置的偏转角度。

这类优化方法通过优化内部的装置, 降低粘滑振动产生的影响, 成本低, 并在室内试验中得到显著效果。但该方法并未抑制粘滑振动, 只是降低粘滑振动对偏重平台的影响。钻头的寿命, 以及钻进速度依旧会受振动影响, 所以如何与其他抑制粘滑振

动方法相结合值得开展相关研究。

4 结论

本文通过对机械式自动垂直钻具的纠斜原理及产生粘滑振动的主要因素进行分析,对现有抑制粘滑振动的方法与机械式自动垂钻工具的相互适应性进行研究,具体结论如下:

(1)对于机械式自动垂直钻具,基于钻井参数优化的抑制粘滑振动的方法,其控制方法复杂且在深井、超深井中使用其抑制效果并不是很突出。如何简化控制方法与机械式自动垂钻相适应是未来研究的重点。

(2)通过钻头的结构优化来抑制粘滑振动的方法可以很好地契合机械式自动垂直钻具,但钻头如何在高钻压下保持使用寿命还需进一步优化。

(3)通过提高额外工作扭矩来克服粘滑振动的方法会产生额外的冲击扭矩,会加剧钻头磨损,使其工作寿命受到影响。而且对于机械式钻具中的偏置机构,额外扭矩会影响其稳定性,影响纠斜效果。所以减少钻头磨损、保持偏重平台稳定是今后的研究重点。

(4)通过机械式垂钻的内部工具优化来减少粘滑振动的方法并未真正地抑制粘滑振动,而只是减少粘滑振动对钻具中执行机构和稳定平台的影响,钻头、钻杆依旧会受到粘滑振动的危害。今后在与其他抑制方法相结合方面值得开展相关研究。

彻底抑制井底粘滑振动或降低其对机械式自动垂直钻具纠斜的影响,在目前乃至未来都是一个重要目标。相信在国内学者的不断研究创新下,机械式垂直钻具系统会更加完善,其防斜纠斜能力可以进一步得到提升,为我国资源勘查提供可靠的技术保障。

参考文献(References):

[1] 杨春旭,韩来聚,步玉环,等.现代垂直钻井技术的新进展及发展方向[J].石油钻探技术,2007,35(1):16-19.
YANG Chunxu, HAN Laiju, BU Yuhuan, et al. New development and future direction of modern vertical drilling technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007,35(1):16-19.

[2] 李昕愉.静态推靠式自动垂直钻具的执行机构设计及纠斜行为研究[D].北京:中国地质大学(北京),2018.
LI Xinyu. Analysis on push-actuator section and straightening behavior of a static push-the-bit vertical drilling tool[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.

[3] 李立鑫,薛启龙,刘宝林,等.机械式自动垂直钻具的纠斜行为

及研究进展[J].西安石油大学学报(自然科学版),2018,33(1):90-97.

LI Lixin, XUE Qilong, LIU Baolin, et al. Straightening behavior analysis and research progress of mechanical automatic vertical drilling tools[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science), 2018,33(1):90-97.

[4] Li Lixin, Xue Qilong, Liu Baolin, et al. Design and mechanical analysis of a new automatic vertical drilling tool used in a slim borehole[R]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017,64(1):12-17.

[5] 李立鑫.自动垂直钻具机械式稳定平台动力学及优化方法研究[D].北京:中国地质大学(北京),2018.
LI Lixin. Research on dynamics and optimization method of mechanical stable platform in automatic vertical drilling tool[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.

[6] 汤历平.钻柱粘滑振动特性及扭转冲击抑制粘滑机理研究[D].成都:西南石油大学,2015.
TANG Liping. Research on stick-slip vibration characteristics of drillstring and mechanism of torsional impacts mitigate stick-slip vibration[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.

[7] Dawson R, Lin Y, Spanos P. Drill-string stick-slip oscillations [C]// Proceedings of the 1987 Conference of the Society of Experimental Mechanics. Houston USA, 1987:590-595.

[8] B. L. VAN DE VRANDE, D. H. VAN CAMPEN, A. DE KRAKER. An approximate analysis of Dry-Friction-Induced Stick-Slip vibrations by a smoothing procedure[J]. Nonlinear Dynamics, 1999,19(2):157-169.

[9] 南旭东,刘佐民,袁智军,等.基于不同摩擦副配对的盘式制动器粘滑特性研究[J].润滑与密封,2008,33(5):39-41.
NAN Xudong, LIU Zuomin, YUAN Zhijun, et al. The study on the stick-slip characteristic of disk brake based on friction pairs[J]. Lubrication Engineering, 2008,33(5):39-41.

[10] 吕苗荣,沈诗刚.钻柱黏滑振动动力学研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2014(6):150-159.
LÜ Miaorong, SHEN Shigang. The simulation and analysis of drillstring stick-slip vibration[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2014(6):150-159.

[11] Thomas Richard, Christophe Germy, Emmanuel Detournay. A simplified model to explore the root cause of stick slip vibrations in drilling systems with drag bits [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007,305(3):432-456.

[12] Christophe Germy, Nathan Van de Wouw, Henk Nijmeijer, et al. Nonlinear drillstring dynamics analysis[J]. Journal of Applied Dynamical Systems, 2009,8(2):527-553.

[13] 刘清友,马德坤,钟青.钻柱扭转振动模型的建立及求解[J].石油学报,2000,21(2):78-82.
LIU Qingyou, MA Dekun, ZHONG Qing. A drilling string torsional vibration model and its solution[J]. Acta Petroleologica Sinica, 2000,21(2):78-82.

[14] 张晓东,朱晓凤,何石,等.钻柱系统粘滑振动稳定性分析及减振方法探讨[J].钻采工艺,2015(2):89-90,94.
ZHANG Xiaodong, ZHU Xiaofeng, HE Shi, et al. Stability analysis of stick-slip vibration of drill string system and discussion of vibration reduction methods[J]. Drilling & Production Technology, 2015(2):89-90,94.

[15] Jansen J D, Steen L. Active damping of torsional drill string vibrations with a hydraulic top drive [J]. SPE Drilling & Completion, 1995,10(4):250-254.

[16] Lin Y Q, Wang Y H. Stick slip vibration of drill strings[J]. ASME Journal Manufacturing Science and Engineer, 1991,

- 113(1):38-43.
- [17] Dareing D W, Tlustý J, Zamudio C. Self-excited vibrations induced by drag bits[J]. *ASME Journal of Energy Resources Technology*, 1990,112(1):54-61.
- [18] Gulyaev V I, Khouidli S N, Glushakova O V. Self-excitation of deep well drill string torsional vibrations[J]. *Strength of Materials*, 2009,41(6):613-622.
- [19] 牟海维,王瑛,韩春杰. 钻柱的粘滑振动规律分析[J]. *石油机械*, 2011,39(3):67-69,81.
MOU Haiwei, WANG Ying, HAN Chunjie. Analysis of drill string stick-slip vibration rules[J]. *China Petroleum Machinery*, 2011,39(3):67-69,81.
- [20] AZADI SASSAN B H. Design of a controller for suppressing the Stick-slip oscillations in oil well drill string[J]. *Research Journal of Recent Sciences*, 2013, 2(6): 78-82.
- [21] HUANG Zhiqiang, DOU Xie, BING Xie, et al. Investigation of PDC bit failure base on stick-slip vibration analysis of drilling string system plus drill bit[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018(417): 97-109.
- [22] 冯程宝,贾晓丽,钟晓玲,等. 深井钻柱自激粘滑振动钻井参数分析[C]. 北京力学学会第二十三届学术年会会议论文集. 北京, 2017:2.
FENG Chengbao, JIA Xiaoli, ZHONG Xiaoling, et al. Analysis of drillstring self-excited stick-slip vibration drilling parameters in deep wells[C]. *Proceedings of the 23rd annual conference of Beijing force society*. Beijing, 2017:2.
- [23] 付蒙,李江红,吴亚锋,等. 钻柱黏滑振动特性仿真与产生机理分析[J]. *西北工业大学学报*, 2016,34(3):467-472.
FU Meng, LI Jianghong, WU Yafeng, et al. Characteristic simulation and mechanisms analysis for drill-strings stick-slip vibration[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2016,34(3):467-472.
- [24] 张焱,陈平,施太和. 深井中钻柱动力学机理研究[J]. *石油机械*, 1998(7):17-21.
ZHANG Yan, CHEN Ping, SHI Taihe. Dynamic mechanism of drillstring in deep well[J]. *China Petroleum Machinery*, 1998(7):17-21.
- [25] 汤历平. 深部硬地层钻头粘滑振动特性及减振方法研究[D]. 成都:西南石油大学, 2012.
TANG Liping. Stick-slip vibration characteristics and vibration reduction method of drill bits in deep hard formation[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- [26] Navarro - Lopez EM. An alternative characterization of bit sticking phenomena in a multi degree of freedom controlled drillstring[J]. *Nonlinear Analysis Real World Applications*, 2009,10(5):3162-3174.
- [27] Abdulgalil F, Sigurewidjane H. Nonlinear friction compensation design for suppressing stick slip oscillations in oil well drillstrings[C]// *Proceedings of the 5th Asian Control Conference*. Melbourne Australia, 2004:1-5.
- [28] 蒋建华. 顶驱软扭矩系统现状及发展趋势[J]. *中国设备工程*, 2017,10(19):132-134.
JIANG Jianhua. The present situation and development trend of soft torque system of top drive[J]. *China Plant Engineering*, 2017,10(19):132-134.
- [29] MONTEIRO H S, TRINDADE M A. Performance analysis of proportional-integral feedback control for the reduction of stick-slip-induced torsional vibrations in oil well drillstrings[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017,398(23):28-38.
- [30] Puebla H, Alvarezramirez J. Suppression of stick-slip in drill-strings: A control approach based on modeling error compensation[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2008,310(4):881-901.
- [31] KARNOPP D. Computer simulation of stick-slip friction in mechanical dynamic systems[J]. *ASME J DYN SYST MEAS Control*, 1990,1(107):100-103.
- [32] 邓嵘,安美,唐东. 复合钻头钻进过程的有限元模拟[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2017,39(2):145-152.
DENG Rong, AN Mei, TANG Dong. Finite element simulation of drilling processes using hybrid bits[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2017,39(2):145-152.
- [33] Pessier R, Damschen M. Hybrid Bits Offer Distinct Advantages in Selected Roller-Cone and PDC - Bit Applications[J]. *SPE Drilling & Completion*, 2011, 26(1):96-103.
- [34] 王宏伟,韩飞,纪友哲,等. PDC 钻头粘滑控制技术现状及发展趋势[J]. *石油矿场机械*, 2016,45(7):104-107.
WANG Hongwei, HAN Fei, JI Youzhe, et al. Status and development tendency of stick-slip controlling technology for PDC bit[J]. *Oil Field Equipment*, 2016,45(7):104-107.
- [35] 高翔. 复合钻头破岩机理及设计研究[D]. 成都:西南石油大学, 2017.
GAO Xiang. Rock breaking mechanism and design of composite bits[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [36] Schell E J, Phillippi D, Fabian R T. New, stable PDC technology significantly reduces hard rock cost per foot[C]// *Proceedings of the SPE/IADC Drilling Conference*. Amsterdam The Netherlands, 2003. SPE No.78797.
- [37] Jaggi A, Upadhaya S and Chowdhury AR. Successful PDC/RSS Vibration management using innovative depth of cut control technology panna field, offshore India[C]// *Proceedings of the SPE/IADC Drilling Conference*. Amsterdam The Netherlands, 2007. SPE No.139839.D
- [38] Davis J, Smyth GF, Bolivar N, et al. Eliminating stick-slip by managing bit depth of cut and minimizing variable torque in the drillstring[C]// *Proceedings of the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, San Diego USA, 2012. SPE No.151133.
- [39] 张岩. 可有效抑制粘滑并提高机械钻速的新型自调节式 PDC 钻头[J]. *江汉石油科技*, 2018,28(2):60-62.
ZHANG Yan. A new type of self-regulating PDC bit with effective stick-slip inhibition and increase of the mechanical penetration rate[J]. *Jiangnan Petroleum Science and Technology*, 2018,28(2):60-62.
- [40] 思娜,邓辉,李婧,等. 贝克休斯自适应 PDC 钻头[J]. *断块油气田*, 2017,24(1):125-130.
SI Na, DENG Hui, LI Jing, et al. Self-adjusting PDC bit of Baker Hughes[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2017, 24(1):125-130.
- [41] 周祥林,张金成,张东清. TorkBuster 扭力冲击器在元坝地区的试验应用[J]. *钻采工艺*, 2012,35(2):15-17.
ZHOU Xianglin, ZHANG Jincheng, ZHANG Dongqing. Experimental application of torkbuster torsional impactor in Yuanba Region[J]. *Drilling & Production Technology*, 2012, 35(2):15-17.
- [42] 周燕,安庆宝,蔡文军,等. SLTIT 型扭转冲击钻井提速工具[J]. *石油机械*, 2012,40(2):15-17.
ZHOU Yan, AN Qingbao, CAI Wenjun, et al. Model SLTIT torsional impact drilling speedup tool[J]. *China Petroleum Machinery*, 2012,40(2):15-17.