

绳索取心复合钻柱的动力学行为研究

梁 健¹, 郭宝科², 王志刚¹, 孙建华¹, 李鑫淼¹, 尹 浩¹

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055)

摘要:绳索取心复合钻柱在岩心钻探“满眼钻进”过程中, 钻杆易出现不同程度的划痕、压痕及磨痕等情况。本文利用非线性有限元方法, 采用三维管单元对绳索取心复合钻柱拉压两处截面的涡动轨迹、涡动速度、横向振动、纵向振动规律进行了分析。结果表明: 转速的增加和钻压的增大会显著增加钻柱与井壁的碰撞次数; 在相同钻压条件下, 随着钻柱回转速度的增大, 钻柱与井壁的碰撞机率增加、接触轨迹增长, 致使钻柱与孔壁的滑动摩擦机会增多; 钻柱的涡动速度均值将随钻压和转速的增加而增大, 转速大于钻压的影响; 转速的增加则会加大钻柱的横向振荡频率, 钻压的增大会增加钻柱横截面的纵向振荡幅值。

关键词:绳索取心钻进; 复合钻柱; 铝合金钻杆; 非线性有限元法; 动力学; 磨损

中图分类号: P634.4⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)07-0034-07

Dynamics Behavior of Compound Drill String for Wire-line Coring/LIANG Jian¹, GUO Bao-ke², WANG Zhi-gang¹, SUN Jian-hua¹, LI Xin-miao¹, YIN Hao¹ (1. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 2. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China)

Abstract: During full-hole core drilling, wire-line coring compound drill string is easy to have scratch, indentation and wear marks. Based on nonlinear finite element method and using three-dimensional pipe unit, two composite sections of compound drill string were analyzed about its dynamics behavior including whirl orbit, whirl speed, lateral vibration and longitudinal vibration. The results showed that with the increase of rotary speed and WOB, the collision time of the drill string and the well wall significantly increased; under the same WOB, along with the increase of the rotary speed, the collision probability of drilling string and well wall increased and the contact trajectory became lengthened, which led to more sliding friction between the drill string and the well wall; with the increase of WOB and rotary speed, the mean value of whirl speed increased, the effect of rotary speed was larger than WOB; the increase of rotary speed would increase the lateral oscillation frequency of drill string, the increase of WOB would increase the longitudinal oscillation amplitude of drill string cross section.

Key words: wire-line core drilling; compound drill string; aluminum alloy drill pipe; non-linear finite element method; dynamics; wear

钻柱是连通地面钻井设备与井底碎岩工具的超长径比杆件。钻井过程中, 其运动状态十分复杂, 主要包括: 自转、涡动、纵向振动、扭转振动、横向振动等。复杂工况致使钻柱失效是钻井施工过程中一个最为常见且昂贵的井内事故。开展钻柱力学研究, 对钻柱进行系统、全面、准确的力学分析, 在井眼轨道设计与控制、钻柱优化设计与强度校核、井身结构、钻井参数优化、井内事故预防等方面具有重要工程意义。整体钻柱力学, 主要研究钻柱的强度问题, 包括钻柱的抗拉扭能力、稳定性、抗振动性、强度校核和优化设计等^[1-3]。

铝合金钻杆与钢钻杆相比, 具有质量轻、比强度

高、钻进深度大、能耗低等优点, 已成为难进入地区钻探、大位移井、定向井、超深井及深部科学钻探钻柱设计的优选方案^[4-8]。铝合金钻杆的材料硬度较低, 大约是钢钻杆的 1/2 ~ 2/3, 在钻进过程中钻柱与井筒摩擦磨损频繁, 导致铝合金钻杆偏向磨损以及易产生划痕和压痕等损伤, 致使钻具承载力降低, 其平均使用寿命是钢钻杆的 1/2 ~ 4/5^[8]。

中国地质科学院勘探技术研究所经多轮立项研究, 铝合金钻杆已初步形成系列化的开发与应用^[9]。铝合金钻杆在使用过程中, 一般采用复合钻柱的形式。2016 年, 经表面强化处理的 P 规格绳索取心铝合金钻杆在辽宁金羊盆地地质调查井“羊 D1

收稿日期: 2017-03-21; 修回日期: 2017-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目“高温环境下铝合金钻杆磨损失效及防护机制研究”(编号: 51404217); 中国地质调查局地质调查项目“地质调查深孔用高强度铝合金钻杆开发应用”(编号: 12120113016800)

作者简介: 梁健, 男, 汉族, 1980 年生, 高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事钻探工程科研工作, 河北省廊坊市金光道 77 号, raul9942718@163.com。

井”中进行了野外生产试验,试验工作量为:下井2次,使用井段248.85~275.35 m,使用时间48 h,井径122 mm。复合钻柱在生产试验过程中,铝钻杆出现了不同程度的划痕及磨损等情况,见图1。

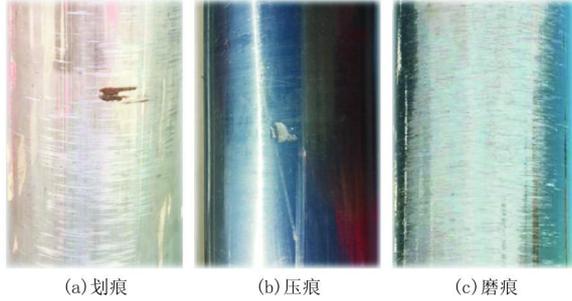


图1 绳索取心铝钻杆划痕、压痕及磨损

本文利用非线性有限元方法,采用三维管单元对满眼钻进绳索取心复合钻柱拉压两处截面的涡动轨迹、涡动速度、横向振动、轴向振动规律进行了分析,从动力学角度解释复合钻柱容易形成划痕、发生磨损的破坏原因,为指导后续铝合金钻杆的磨损防护再制造工艺试验及复合钻柱野外生产钻进参数优化提供支撑。

1 有限元法及三维管单元

钻柱力学研究中常用的方法主要有:经典微分方程法、能量法、加权残值法、有限差分法、纵横弯曲连续梁法、有限元法。有限元法是一种数值计算方法,由于其原理简单,易于操作,在钻柱动力学中应用较为广泛^[10-13]。

在有限元计算中,钻柱通常采用平面梁单元和空间梁(管)单元进行离散。三维管单元是空间上的一维线单元,每个单元包含2个节点,每个节点具有6个自由度,即有6个广义位移和6个广义力^[14]:

$$a^e = \{a_1 \quad a_2\}^T \quad (1)$$

$$P^e = \{P_1 \quad P_2\}^T \quad (2)$$

$$a_i = \{u_i \quad v_i \quad w_i \quad \theta_{xi} \quad \theta_{yi} \quad \theta_{zi}\}^T, i=1,2 \quad (3)$$

$$P_i = \{N_{xi} \quad N_{yi} \quad N_{zi} \quad M_{xi} \quad M_{yi} \quad M_{zi}\}^T, i=1,2 \quad (4)$$

式中: u_i, v_i, w_i ——节点*i*在局部坐标系中三个方向的线位移; $\theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}$ ——节点*i*处横截面绕三个坐标轴的转动角位移; θ_{xi} ——横截面的扭转; θ_{yi}, θ_{zi} ——分别代表横截面在*xz, xy*坐标面内的转动; N_{xi} ——节点*i*的轴向力; N_{yi}, N_{zi} ——节点*i*在*xy, xz*面内的剪力; M_{xi} ——节点*i*处横截面上的扭矩; $M_{yi},$

M_{zi} ——节点*i*在*xz, xy*面内的弯矩。

假设管单元横截面积为*A*,在*xz*面内横截面惯性矩为*I_y*,在*xy*面内横截面惯性矩为*I_z*,单元的扭转惯性矩为*J*。因此,长度为*l*,材料弹性模量和剪切模量分别为*E, G*的2节点空间杆单元在单元局部坐标系内的刚度矩阵*K^e*可以表示为:

$$K^e = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$k_{11} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 & \frac{4EI_y}{l} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{l} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$k_{12} = k_{21} = \begin{bmatrix} -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{l^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & 0 & \frac{2EI_y}{l} & 0 \\ 0 & -\frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{l} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$k_{22} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{l^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^3} & 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & 0 & \frac{4EI_y}{l} & 0 \\ 0 & -\frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{l} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中:

$$I_z = \int_A y^2 dA, I_y = \int_A z^2 dA, J = \int_A \sqrt{x^2 + y^2} dA$$

2 基本假定与边界条件

采取如下假设:钻柱与地层之间相互力学作用时,钻柱为完全弹性杆,井眼截面为圆形并且在与钻柱碰撞过程中不变形,钻柱的变形为小变形,钻柱与井壁摩擦系数取为 0.01;忽略钻柱接头;不考虑钻井液作用的影响。

钻柱上、下两端的边界均为三维球铰约束,铰支在井眼中心,上端钻柱受拉力作用,下端钻头处有钻压作用。当钻柱形心的横向位移大于钻柱和井筒之间的间隙时,钻柱将与井壁接触。

为了定性地考察井下钻柱横截面的运动特征与其所处位置的关系,选取井下两处横截面作为研究对象:选取井下 5 m 处横截面,该处受拉扭复合应力最大,又尽可能减小井口边界条件对其横向运动的影响;选取井下 400 m 处横截面,是考虑在轴向压力最大时井下钻柱横截面的运动特征。

3 钻柱动力学行为及磨损形式

本文采用的钻柱组合为:Ø114.3mm × 6.5 mm 钢钻杆(100 m) + Ø114.3mm × 6.5 mm 铝钻杆

(250 m) + Ø114.3mm × 6.5 mm 钢钻杆(50 m) + Ø122 mm 绳索取心钻具(4.5 m);钻孔直径为 122 mm。

在“羊 D1 井”钻探施工过程中,采用了地质岩心钻探最具代表性的全液压力头回转钻进,本文采用了该井钻进参数中的 2 种钻压(14、18 kN)、2 种转速(252、494 r/min),分析了绳索取心复合钻柱拉压两处截面的涡动轨迹、涡动速度、横向振动、轴向振动的行为规律。

3.1 涡动轨迹

本文在考虑钻柱在井下的涡动轨迹时,对此处钻杆横截面中心点偏离钻井横截面中心点的距离做了归一化处理,即:当此坐标为 0 时,表示此时钻杆无偏移;当此坐标为 1 时,表示钻杆外壁与钻井内壁接触。

钻头在井底部承受不同的钻压时,井下 5 m 处钻柱横截面承受的轴向力为拉力,随着井底钻头钻压的增大,此处横截面的拉力将减小。从图 2 中可以看出,无论钻压值(14 kN 或 18 kN)和钻柱回转转速值(252 r/min 或 494 r/min)为多大,此处横截面外边缘都不与井壁接触碰撞。随着钻压逐渐增大,或钻柱回转转速逐渐增加时,钻柱的涡动轨迹范围也逐渐增大。

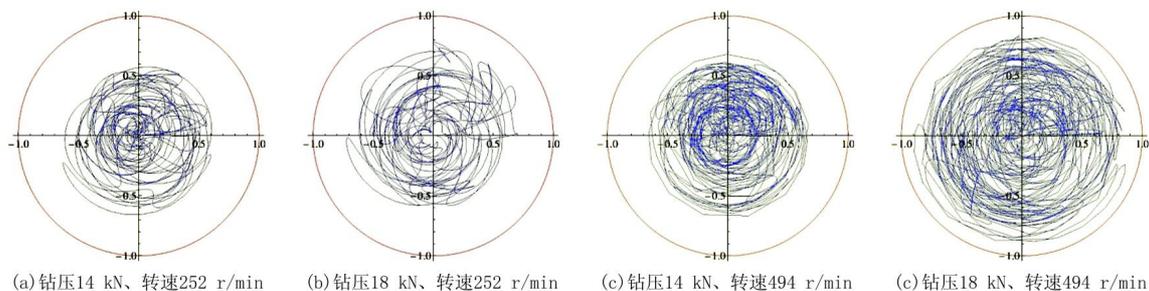


图 2 井下 5 m 处横截面涡动轨迹

由图 3 可以看出:在相同钻压条件下,随着钻柱回转速度的增加,钻柱较多的绕钻井的中心点外围发

生涡动运动,钻柱与井壁的接触次数增加,接触时的轨迹也增长,即钻柱与井壁的摩擦概率和接触时长

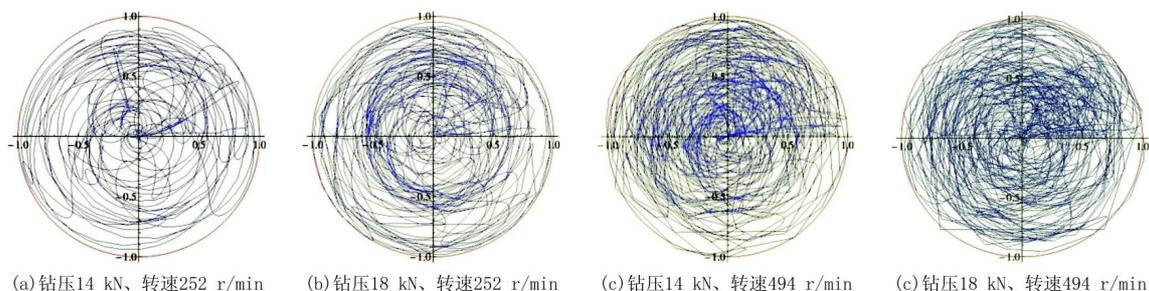


图 3 井下 400 m 处横截面涡动轨迹

增加,钻柱与井壁之间产生滑动摩擦的机会增多,钻柱易于发生滑动摩擦形式的破坏;当钻柱具有相同回转速度时,随着钻压的增加,钻柱与井壁接触时的接触正应力增大,从而一定程度上增加了钻柱与井壁发生滑动摩擦时的最大静滑动摩擦力的极限值,此时钻柱与井壁之间的摩擦形式会较多的表现为滚动摩擦的形式,在钻压较大时,钻柱的破坏形式则较多的倾向于碰撞时的强度破坏。

3.2 涡动速度

图 4、图 5 是不同钻压、不同转速条件下,拉压两处钻柱涡动速度随时间的变化规律。从数值的变化规律可以发现:无论是钻压的增大,还是钻柱回转速度的增加,均会不同程度的增加钻柱的涡动速度均值;相比之下,钻柱回转速度的影响大于钻压的

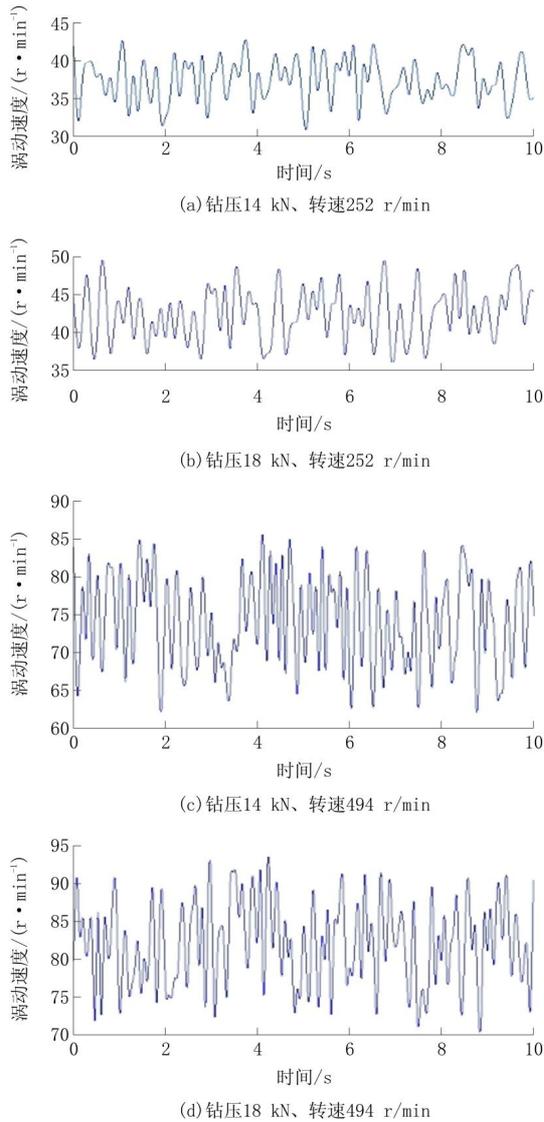


图 4 井下 5 m 处横截面涡动速度

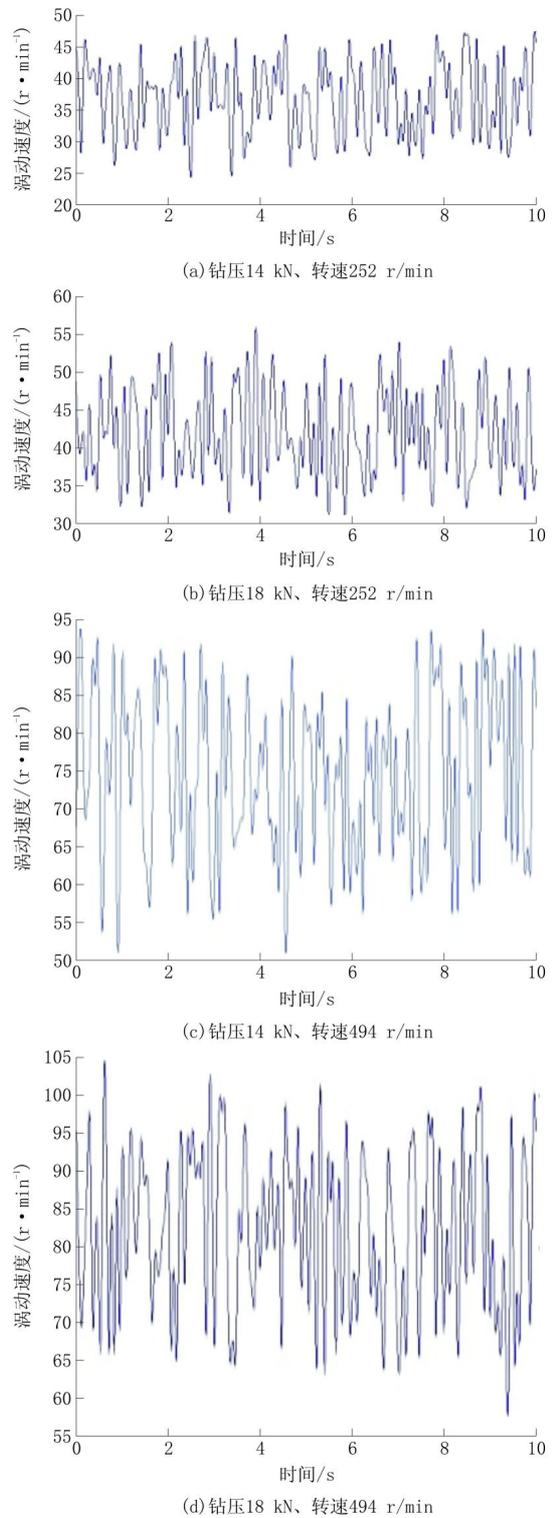


图 5 井下 400 m 处横截面涡动速度

影响;同时,横截面内轴力为负时(即为压力),将增大涡动速度的振荡范围。

3.3 横向振动

图 6、图 7 描述了不同钻压、不同回转速度条件

下,拉压两处钻柱的横向位移随时间变化规律。图中可以看出:随着钻柱回转速度的增加,钻柱与井壁的碰撞次数显著增加;同时,钻压的增大,也会在一定程度上增加这种碰撞概率。与钢钻杆相比,铝合金钻杆材料硬度较小,其弹性模量约为钢钻杆的1/3,为此,碰撞的过程为铝合金钻杆表面出现压痕提供了基础条件。

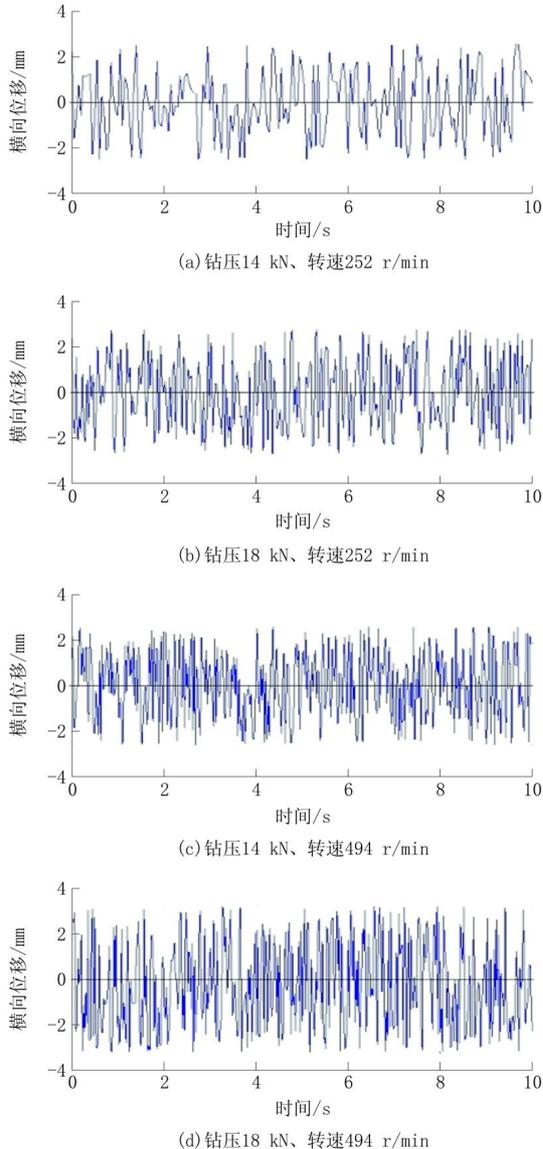


图6 井下5 m处横截面横向振动

3.4 轴向振动

图8、图9描述了不同钻压、不同回转速度条件下,拉压两处钻柱的轴向位移随时间变化规律。从图中可以看出:钻杆的轴向振动幅值并不大,考虑到全部载荷条件的变化情况,钻杆的轴向振动幅值相差30%~50%,但轴向振动幅值主要取决于钻压的

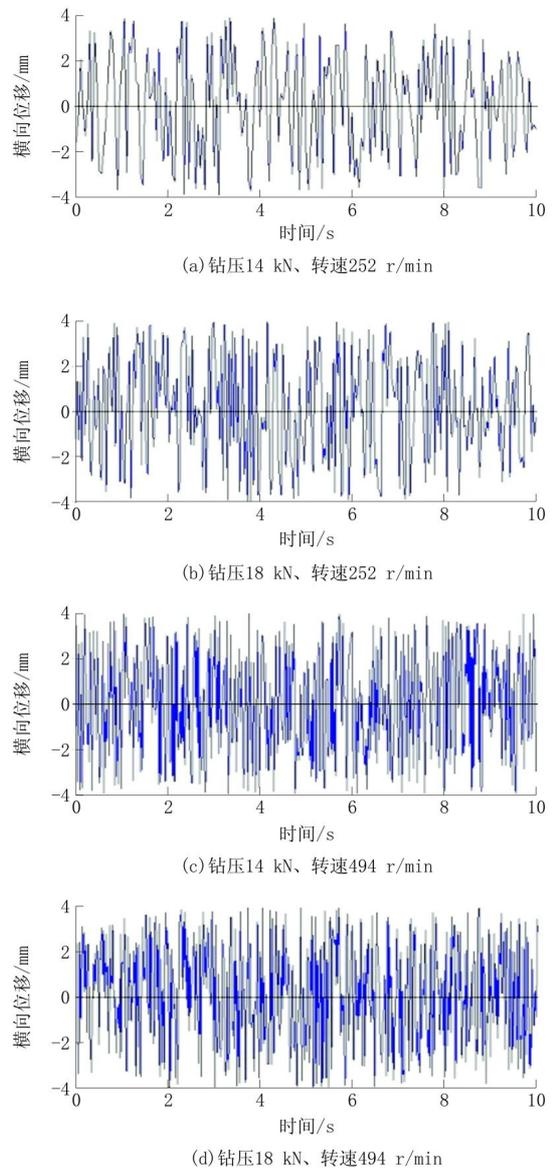


图7 井下400 m处横截面横向振动

变化。本分析中复合钻柱设计较多的使用了铝合金钻杆,由于其质量较小,体现的轴向载荷波动幅值不大。

4 野外生产试验情况对比分析

表1是“羊D1井”铝合金钻杆井下使用后直径磨损的变化值,测量点的选取位置见图10。从表1中可以看出:钢接头的平均磨损量低于铝合金杆体的平均磨损量,这是由于铝合金杆体的材料硬度较低,与井壁接触后易产生偏向磨损、划痕和压痕等损伤;在同一回次井下使用条件下,经表面微弧氧化处理的铝合金钻杆相对于未经表面处理的铝合金钻杆具有较好的耐磨性,这说明表面强化技术有利于

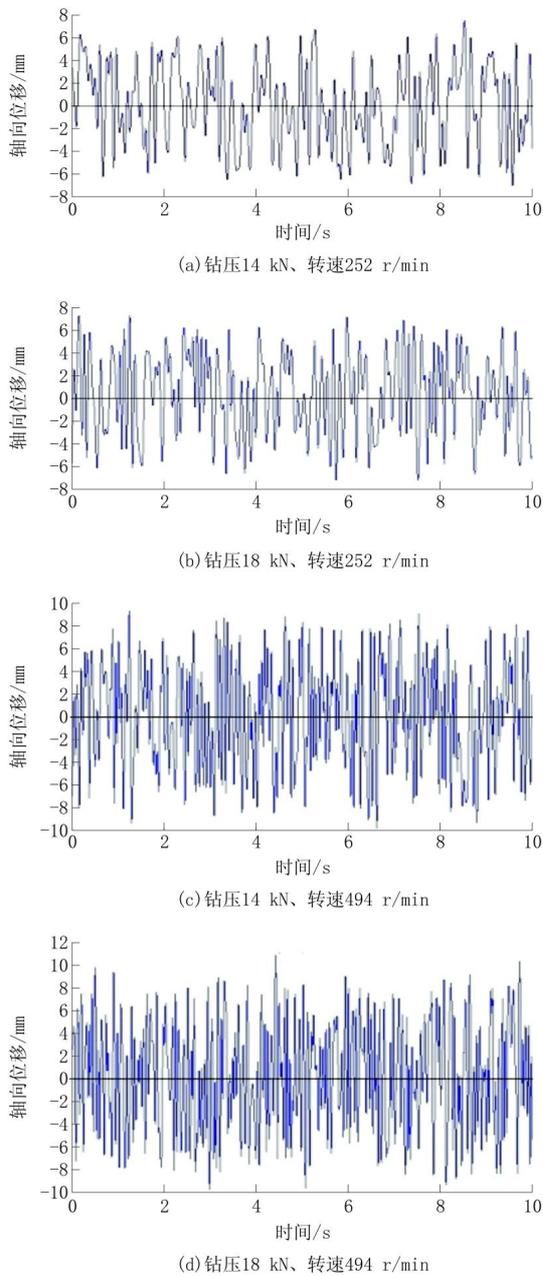


图 8 井下 5 m 处横截面轴向振动

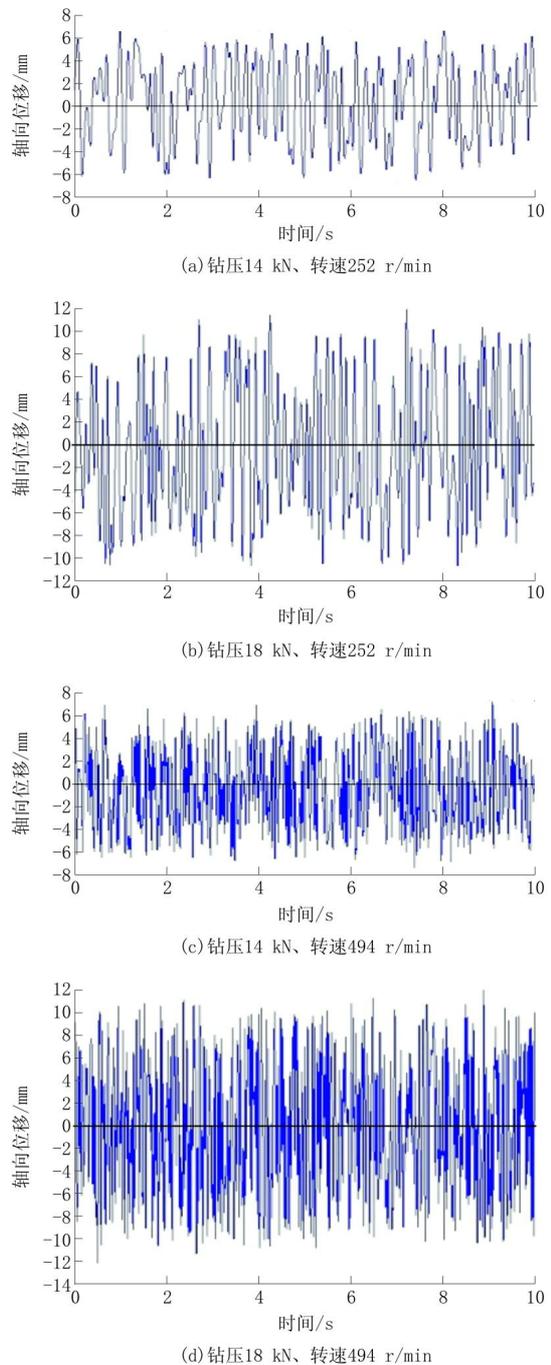


图 9 井下 400 m 处横截面轴向振动

铝合金钻杆的磨损防护;不同的钻进参数条件下,相对的小钻压及低转速可减轻铝合金钻杆的磨损,野外生产试验铝合金钻杆磨损情况较好地验证了绳索取心复合钻柱的动力学行为特性。

5 结论

本文利用非线性有限元方法分析了绳索取心复合钻柱的动力学行为,结论如下。

(1)转速的增加和钻压的增大会显著增加钻柱与井壁的碰撞次数;在相同钻压下,钻柱回转速度的

增大会增长接触轨迹使得钻柱与井壁之间产生滑动摩擦的机会增多。

(2)钻柱的涡动速度均值会随着钻压和钻柱回转速度的增加而增大,但钻柱回转速度的影响要大于钻压的影响。

(3)钻压的增加会增加钻柱横截面的轴向振荡幅值;钻柱回转速度的增加则会加剧钻柱的横向振荡频率。

表1 铝合金钻杆磨损直径变化值

钻杆类型	直径的变化值/mm					井下使用回次	钻进参数
	A	B	C	D	E		
未经表面处理-01	0.72	0.34	0.96	0.86	0.37	第一次下井,下井时间24 h	钻压16~18 kN,转速450 r/min左右
微弧氧化-01	0.66	0.65	0.83	0.57	0.53		
未经表面处理-02	0.56	0.34	0.61	0.74	0.54	第二次下井,下井时间24 h	钻压12~15 kN,转速250 r/min左右
微弧氧化-02	0.45	0.06	0.53	0.46	0.73		

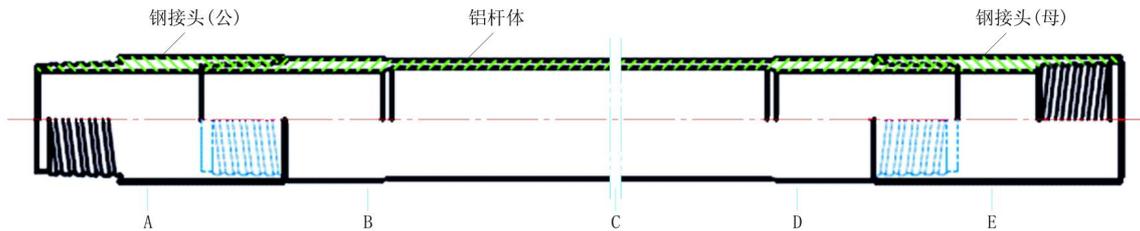


图10 铝合金钻杆直径测量示意图

(4)与钢钻杆相比,铝合金钻杆硬度低、耐磨性差,绳索取心复合钻柱的动力学行为特性为铝合金钻杆出现较大长度的划痕及横向磨痕提供了依据。

参考文献:

- [1] 李子丰. 钻柱力学基本方程及其应用[J]. 力学学报, 1995, 27(4): 406-414.
- [2] 李子丰. 钻柱力学研究中几个值得探讨的问题[J]. 石油机械, 1996, 24(8): 32-35.
- [3] 狄勤丰, 王文昌, 胡以宝, 等. 钻柱动力学研究及应用进展[J]. 天然气工业, 2006, 26(4): 57-59.
- [4] 吕拴录, 骆发前, 周杰, 等. 铝合金钻杆在塔里木油田推广应用前景分析[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(3): 74-77.
- [5] M. Y. Gelfgat, V. S. Basovich, et al. Aluminum vs. Steel: Preventing Drill String Buckling when Drilling Horizontally [J]. Oil & Gas Eurasia, 2007, (6): 32-38.
- [6] 鄢泰宁, 薛维, 卢春华. 铝合金钻杆的优越性及其在地探深孔中的应用前景[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(2): 27-29.
- [7] 孙建华, 梁健, 张永勤, 等. 地质钻探高强度铝合金钻杆研制及其应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(7): 5-8.
- [8] Aquatic Company, Maurer Engineering Inc. Development of aluminum drill pipe in Russia (Final Report TR99-23) [R]. Implement Russian Aluminum Drill Pipe and Retractable Drilling Bits into the USA, 1999, Contract No: DE-FG26-98FT40128.
- [9] 孙建华, 梁健, 王立臣, 等. 深部钻探铝合金钻杆开发应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(4): 34-39.
- [10] 胡以宝, 狄勤丰, 邹海洋, 等. 钻柱动力学研究及监控技术新进展[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(6): 7-10.
- [11] 唐继平, 狄勤丰, 胡以宝, 等. 铝合金钻杆的动态特性分析及其磨损机制[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 684-688.
- [12] 胡以宝, 狄勤丰, 王文昌, 等. 斜直井眼中转速对钻柱动力学特性的影响[J]. 工程力学, 2010, 27(5): 184-190.
- [13] 胡以宝. 基于实际井眼轨迹的钻柱动力学特性有限元分析[D]. 上海: 上海大学, 2011.
- [14] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.