◀钻井技术与装备▶

超深井底部钻具组合动力学防斜特性研究*

席传明[1] 王灿坤[2] 蒋振新[1] 余成秀[3] 罗 江[4] 曾德智[3]
（1. 中国石油新疆油田分公司采油工艺研究院 2. 中国石油新疆油田分公司油田工程技术部 3. 西南石油大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室 4. 中石油川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院）

席传明，王灿坤，蒋振新，等. 超深井底部钻具组合动力学防斜特性研究［J］. 石油机械，2026，54（9）：38-46.

Xi Chuanming，Wang Cankun，Jiang Zhenxin，et al. Deviation-control characteristics of bottomhole assemblies in ultra-deep wells［J］. China Petroleum Machinery，2026，54（9）：38-46.

摘要：防斜打快是实现安全高效钻井的关键技术之一。为进一步发挥螺杆钻具的高转速提速优势并增强其防斜作用，应用有限元仿真软件，建立了单弯单稳螺杆钻具组合和预弯曲动力学钻具组合的刚柔耦合模型，开展了不同井斜角和井眼扩径条件下钻铤形心运动轨迹、钻头动态冲击载荷及上稳定器碰撞力的动力学特征分析；以钻头动态冲击载荷和稳定器碰撞力作为优选评价指标，明确2种钻具组合的防斜能力。研究结果表明：井斜角由1°增至5°时，单弯单稳螺杆钻具组合的平均钻头动态冲击载荷增加约0.59 kN，预弯曲动力学钻具组合指向下井壁的钻头动态冲击载荷和上稳定器碰撞力均增大；井眼扩径系数由1.02增至1.20后，前者仍具较强防斜能力，后者稳定涡动形成时间延后约3.7 s，防斜能力减弱。现场应用结果表明，相较于单钟摆和直螺杆钻具，采用单弯单稳螺杆钻具组合可将井斜角从7.89°降至6.71°，平均机械钻速提高113.8%。研究结果可为超深井防斜钻具组合设计提供理论支持，对于提升超深井直井钻井效率具有重要参考价值。

关键词：超深井；防斜打快；单弯单稳螺杆钻具组合；预弯曲动力学钻具组合；动力学模型；动态冲击载荷；井斜角

中图分类号：TE921 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202505090

Deviation-Control Characteristics of Bottomhole Assemblies in Ultra-Deep Wells

Xi Chuanming[1] Wang Cankun[2] Jiang Zhenxin[1] Yu Chengxiu[3] Luo Jiang[4] Zeng Dezhi[3]
（1. *Oil Production Technology Research Institute*, *PetroChina Xinjiang Oilfield Company*; 2. *Oilfield Engineering and Technology Department*, *PetroChina Xinjiang Oilfield Company*; 3. *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation*, *Southwest Petroleum University*; 4. *CCDC Drilling & Production Technology Research Institute*）

Abstract: Deviation control and fast drilling is a key technology for safe and efficient drilling. It is necessary to further leverage the advantage of positive displacement motor（PDM）in accelerating drilling via its high rotational speed and enhance its performance in deviation control. In this study, using finite element simulation software, rigid-flexible coupling models of the single-bend single-stabilizer PDM bottomhole assembly（BHA）and the pre-bent dynamic BHA were established to analyze the dynamic characteristics of the drill-collar centroid trajectory, bit dynamic impact load, and upper stabilizer collision force under different borehole inclination angles

* 基金项目：国家自然科学基金项目“腐蚀与脉动冲击载荷共同作用下超高强度钻具疲劳损伤行为与控制机制研究”（51374177）。

© Editorial Office of *China Petroleum Machinery*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

and borehole enlargement conditions. The bit dynamic impact load and stabilizer collision force were adopted as evaluation indices to determine the deviation control capabilities of the two BHAs. The results show that, as the borehole inclination angle increases from 1° to 5°, the single-bend single-stabilizer PDM BHA demonstrates an increase of the average bit dynamic impact load by approximately 0.59 kN, while the pre-bent dynamic BHA exhibits increase in both the bit dynamic impact load directed toward the low sidewall of the borehole and the upper stabilizer collision force. When the borehole enlargement coefficient increases from 1.02 to 1.20, the single-bend single-stabilizer PDM BHA retains a strong deviation control capability, while the pre-bent dynamic BHA shows a delay in the formation of stable whirl by approximately 3.7 s, resulting in weakened deviation control capability. Field application indicates that, compared with single-pendulum and straight PDM BHAs, the single-bend single-stabilizer PDM BHA reduces the borehole inclination angle from 7.89° to 6.71° and increases the average rate of penetration (ROP) by 113.8%. The research results provide theoretical support for the design of deviation-control BHAs for ultra-deep wells and offer an important reference for improving vertical drilling efficiency in ultra-deep wells.

Keywords: ultra-deep well; deviation control and fast drilling; single-bend single-stabilizer PDM BHA; pre-bent dynamic BHA; dynamic model; dynamic impact load; borehole inclination angle

0　引　言

随着深层超深层油气资源勘探开发力度逐年增加，复杂地质条件及工程技术难点制约钻井综合经济效益提升的问题愈发明显[1-4]。其中对于井深超过6 000 m的超深井直井，防斜打快是实现安全高效钻井的关键技术之一[5-6]。若井斜超过井身质量控制规范要求，不仅难以准确钻达目的油气层位，还会增加井下分层开采和注水工作难度，甚至出现被迫中途填井的情况[7-8]。

近年来，螺杆钻具组合因具有低成本、高提速、强纠斜等明显优势被大规模推广[9-14]。为进一步发挥螺杆钻具高转速提速优势并增强其防斜作用，众多学者对其动力学特性展开了广泛研究。狄勤丰等[15]利用动力学理论评价了预弯曲钟摆钻具组合的防斜特性。钟文建等[16]建立了全井钻柱动力学特性仿真模型，模拟了钻柱横向运动轨迹。刘科柔等[17]在Jansen动力学模型的基础上评价了双稳定器预弯曲钻具组合防斜特性。Kapitaniak等[18]通过多功能试验装置进行钻柱动力学分析，模拟了井下黏滑振荡、钻柱螺旋屈曲等现象。赵润琦[19]利用“螺杆钻具+复合钻头”钻井提速技术显著提高了须家河组高研磨性地层机械钻速。然而，钻具与井壁之间的动态接触、钻头载荷波动等关键参数尚未形成系统化的防斜效果评价体系，导致现场钻具组合优选仍缺乏可靠的动力学依据。

基于上述问题，笔者建立了考虑钻柱屈曲变形后与井壁碰撞接触的刚柔耦合仿真模型。系统对比分析了单弯单稳螺杆钻具组合与预弯曲动力学钻具组合，在不同井斜角与井眼扩径条件下的钻铤形心轨迹、钻头动态冲击载荷及上稳定器碰撞力等动力学特征。研究结果可为超深井防斜钻具组合设计提供理论支持，对于提升超深井直井钻井效率具有重要参考价值。

1　底部钻具组合动力学仿真模型

钻柱动力学研究的关键是如何描述井壁、钻柱的碰撞接触问题，包括2个非线性难点：几何非线性和动态接触非线性[20]。当钻压和扭矩共同作用于钻头破碎岩石时，钻柱发生弯曲变形，但是受到井壁的约束存在动态碰撞接触。

1.1　柔性体微分方程

在任何深度、任何水平剖面发生的接触问题均属于接触非线性动力学问题，因此对模型进行如下假设：①在整个模拟过程中，钻杆保持线弹性状态，不考虑塑性变形；②在钻杆受力发生变形之前，钻杆与井眼的轴线重合；③井眼在任一水平截面都是等径圆；④井壁是刚性体，与钻杆接触时不发生变形。

采用动力学仿真软件进行仿真分析。首先给柔性体赋予一个模态集；其次通过一对线性组合，即模态向量与模态坐标，表示物体某一点的弹性位移；最后将物体所有区域每一时刻的弹性位移线性叠加便可描述其变形运动，柔性体的创建则通过有限元分析软件来完成。采用拉格朗日乘子法建立含约束关系的柔性体微分方程进行求解：

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{\xi}}+\dot{\boldsymbol{M}}\dot{\boldsymbol{\xi}}-\frac{1}{2}\left[\frac{\partial \boldsymbol{M}}{\partial \boldsymbol{\xi}}\dot{\boldsymbol{\xi}}\right]^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{\xi}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{\xi}+\boldsymbol{f}_{g}+\boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{\xi}}+\left[\frac{\partial \boldsymbol{\psi}}{\partial \boldsymbol{\xi}}\right]^{\mathrm{T}}\lambda=\boldsymbol{Q} \tag{1}$$

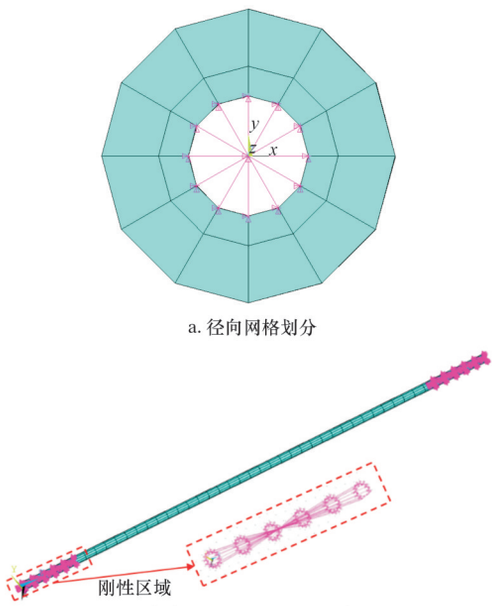
式中：$\boldsymbol{M}$为质量矩阵，kg；$\dot{\boldsymbol{M}}$为柔性体质量矩阵的时间导数，kg/s；$\boldsymbol{K}$为模态刚度矩阵，N/m；$\boldsymbol{D}$为模态阻尼矩阵，（N·s）/m；$\boldsymbol{\xi}$为广义位移，m；$\dot{\boldsymbol{\xi}}$为广义速度，m/s；$\ddot{\boldsymbol{\xi}}$为广义加速度，m/s^2；$\boldsymbol{K}\boldsymbol{\xi}$为弹性变形的广义力，N；$\boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{\xi}}$为阻尼的广义力，N；$\boldsymbol{f}_g$为广义重力，N；$\lambda$为拉格朗日乘子；$\boldsymbol{\psi}$为约束方程向量，N·m；$\boldsymbol{Q}$为外力广义力，N。

1.2　柔性钻铤模型

利用有限元分析软件建立长度 9 000 mm、外径 140 mm、内径 57.2 mm 的钻铤模型。钻铤轴向方向上网格长度为 200 mm，端面或横截面上等间距划分为 12 份，如图 1a 所示。网格划分完成后，在钻铤上下两端相同圆柱中心处创建连接点，然后对质量单元设置实常数应用于所创建的连接点。为实现钻铤上下两端控制节点的力加载和驱动约束，将钻铤上下端一定长度范围内的柔性体网格节点分别与对应控制节点耦合，并定义为刚性连接区域，最终结果如 1b 所示。

1.3　螺杆钻具刚柔耦合模型

建立的螺杆钻具刚柔耦合模型主要包括井壁、井底岩石、钻铤、稳定器、螺杆和钻头，其中钻铤为柔性体，其余部分为刚性体。螺杆钻具组合各构件间约束关系如下：钻铤与井壁为平行约束，井壁与大地、钻铤与稳定器、钻铤与螺杆、螺杆与钻头为固定约束。为使底部钻具组合在井筒中能够按照井底实际工况进行旋转运动，对模型施加了相应的边界条件与载荷。具体而言，对整个底部钻具施加重力载荷，在钻柱与井壁、钻头与井底岩石之间施加接触力，在井底岩石与大地之间施加轴套力，并在上端钻铤的刚性连接点处施加单向约束力和旋转驱动力。平行约束用于模拟钻铤在井筒内的运动，仅保留沿井眼轴线（z轴）的平移和绕井眼轴线（z轴）旋转 2 个自由度；限制 2 个横向（x、y方向）的平移和绕 2 个横向（x、y轴）旋转 4 个自由度。固定约束用于模拟部件间的刚性连接。该约束完全限制 6 个自由度（沿 x、y、z轴的平移与旋转）。



a. 径向网格划分

b. 轴向网格划分及刚性区域

图 1　钻铤网格划分

Fig. 1　Grid division of drill collar

钻具组合结构尺寸如表 1 所示。

2　钻柱瞬态动力学特征分析

2.1　钻铤形心轨迹特征

钻压为 80 kN、转盘转速为 80 r/min、井斜角为 1°、井眼扩径系数为 1.02 时，单弯单稳螺杆钻具组合和预弯曲动力学钻具组合的钻铤形心运动轨迹分别如图 2 和图 3 所示。由图 2 可知：单弯单

表 1　单弯单稳螺杆钻具组合和预弯曲动力学钻具组合结构尺寸

Table 1　Structural dimensions of single-bend single-stabilizer PDM BHA and pre-bent dynamic BHA

单弯单稳螺杆钻具组合					预弯曲动力学钻具组合				
部位	外径/mm	内径/mm	长度/mm	备注	部位	外径/mm	内径/mm	长度/mm	备注
钻头	190		350		钻头	190		350	
弯螺杆	146	57.2	1 000	弯角0.5°,距钻头1 000 mm	下稳定器	185	57.2	500	距钻头700 mm
钻铤	140	57.2	9 000		预弯短节	140	57.2	800	弯角0.5°,距下稳定器800 mm
稳定器	187	57.2	900		直螺杆	140	57.2	7 500	
钻铤	140	57.2	9 000		上稳定器	187	57.2	900	
井壁	250	194	28 000	扩径2%	钻铤	140	57.2	9 000	
井底岩石	250		100	与井壁底部相距1 mm	井壁	250	194	20 000	扩径2%
					井底岩石	250		100	与井壁底部相距1mm

稳螺杆钻具组合条件下，由于钻头与井底岩石、稳定器与井壁不断碰撞接触，底部钻具同时存在横向和纵向振动[21]，且横向振动更为强烈；钻铤形心初始为不规则运动，逐渐转变为距井眼轴线先增大后减小的圆周往复运动；井眼横截面y方向的位移量处于±20 mm范围内，整体运动轨迹表现出较强的不规则性。

预弯曲动力学钻具组合同样由于自身的结构弯角使钻柱质心偏心[22]。在钻具旋转过程中，钻柱发生向后涡动，钻铤形心运动轨迹转变为顺时针方向，横截面y方向的位移量在−27~16 mm范围内（见图3）。此时涡动轨迹靠近于下井壁，有利于减小井斜。

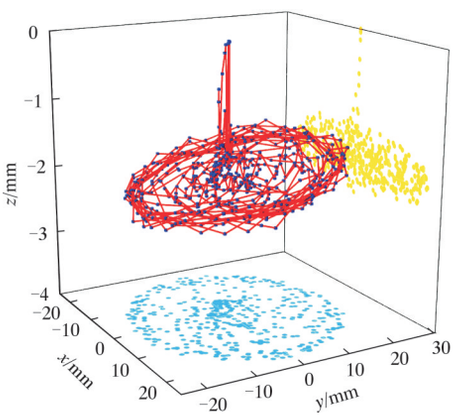


图2　单弯单稳螺杆钻具组合钻铤形心轨迹图（井斜角1°）

Fig. 2　Drill-collar centroid trajectory of the single-bend single-stabilizer PDM BHA (at borehole inclination angle of 1°)

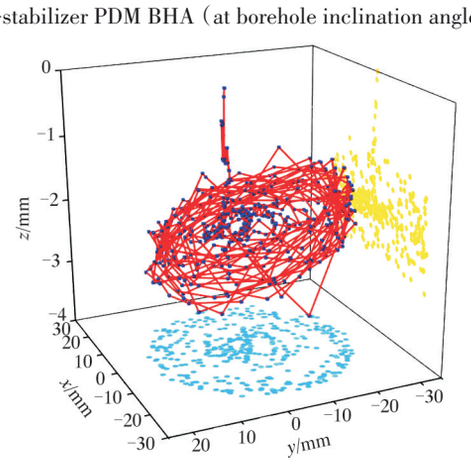


图3　预弯曲动力学钻具组合钻铤形心轨迹图（井斜角1°）

Fig. 3　Drill-collar centroid trajectory of the pre-bent dynamic BHA (at borehole inclination angle of 1°)

其他条件不变，将井斜角由1°增加至5°，单弯单稳螺杆钻具组合和预弯曲动力学钻具组合的钻铤形心运动情况分别如图4和图5所示。随着井斜角增大，指向下井壁的重力分量增强，钻铤形心运动更加受到重力作用控制，其在井眼横截面y方向的位移量在−16~18 mm范围内（见图4）。

由图5可知：预弯曲动力学钻具组合初始同单弯单稳螺杆钻具组合相似，在重力主导作用下钻铤形心波动下降约15 mm；底部钻具组合在转速增加过程中，上端钻铤向后涡动趋势逐渐明显，与井斜角1°保持一致，横截面y方向的位移量处于−27~16 mm范围内，贴近于下井壁，且涡动轨迹较井斜角1°时更为明显。

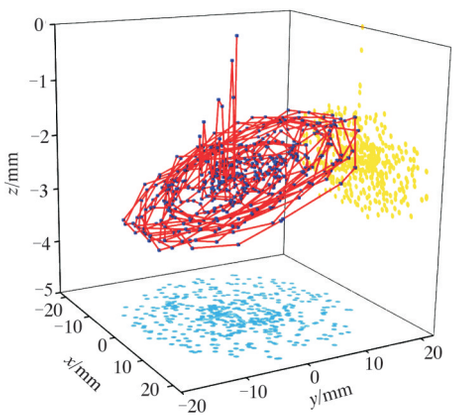


图4　单弯单稳螺杆钻具组合钻铤形心轨迹图（井斜角5°）

Fig. 4　Drill-collar centroid trajectory of the single-bend single-stabilizer PDM BHA (at borehole inclination angle of 5°)

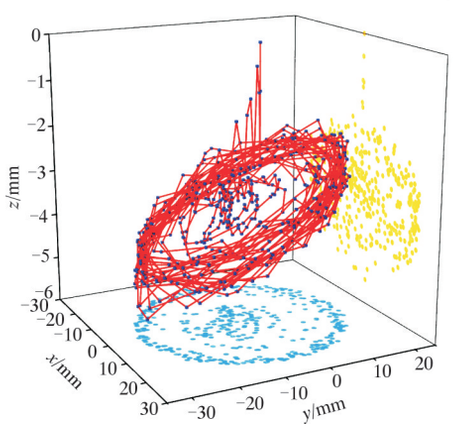


图5　预弯曲动力学钻具组合钻铤形心轨迹图（井斜角5°）

Fig. 5　Drill-collar centroid trajectory of the pre-bent dynamic BHA (at borehole inclination angle of 5°)

保持井斜角为5°，其他条件不变，将井眼扩径系数由1.02增加至1.20，钻铤形心轨迹如图6和图7所示。单弯单稳螺杆钻具组合条件下，由于井眼扩径系数大幅增加，重力作用下稳定器和上端钻铤始终贴于下井壁且绕井眼轴线转动趋势弱，使得上端钻铤形心轨迹最大位移一直为负（见图6）。而预弯曲动力学钻具组合上下两端稳定器与井壁的碰撞摩擦力大大减弱，使得初始钻铤形心运动轨迹始终位于下井壁；随着稳定器与井壁碰撞摩擦加剧，底部钻柱向后涡动趋势增强，保持稳定后横截面y方向的位移量处于−44~34 mm范围内，最大位移处始终贴于下井壁（见图7）。

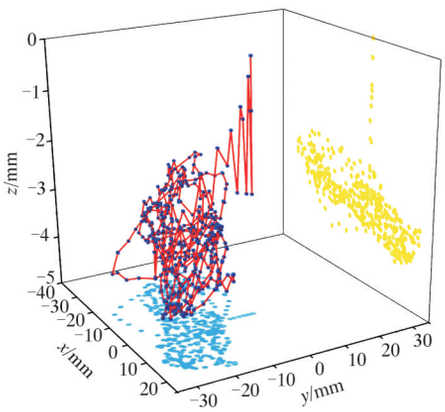


图 6　单弯单稳螺杆钻具组合钻铤形心轨迹图（井眼扩径系数 1.20）

Fig. 6　Drill-collar centroid trajectory of the single-bend single-stabilizer PDM BHA (at borehole enlargement coefficient of 1.20)

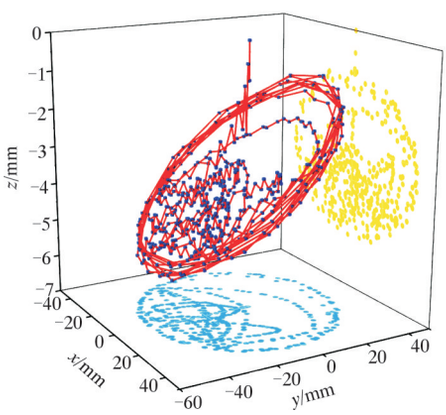


图 7　预弯曲动力学钻具组合钻铤形心轨迹图（井眼扩径系数 1.20）

Fig. 7　Drill-collar centroid trajectory of the pre-bent dynamic BHA (at borehole enlargement coefficient of 1.20)

2.2　钻头动态冲击载荷变化

钻头对井底岩石作用力的大小及方向是影响井斜的关键因素[23-27]。根据所建立模型展开对应分析（钻压为 80 kN，转速为 80 r/min），设钻头对井底岩石作用力方向指向下井壁时为负，指向上井壁时为正。图 8 为钻头动态冲击载荷随时间变化曲线。

由图 8a 可知，井斜角为 1°时，钻头对下井壁的动态冲击载荷明显高于上井壁。在稳定旋转后，单弯单稳螺杆钻具组合的钻头动态冲击载荷指向上井壁的波动范围为 0~0.72 kN，而指向下井壁时的范围为−1.68~0 kN，平均钻头动态冲击载荷为−0.62 kN。原因是单弯单稳螺杆钻具组合在转动过程中产生较大离心惯性力，且重力分量指向下井壁，使降斜趋势更为明显。预弯曲动力学钻具组合的钻头动态冲击载荷在 0~3 s 时，由于结构弯角的偏心作用和井斜角的重力作用，对井底岩石的作用力方向指向下井壁，动态冲击载荷波动范围为−4.89~0 kN。但由于上、下稳定器不断与井壁发生高速碰撞摩擦，从而在钻头上形成侧向冲击载荷，重力影响下使得 3 s 后钻头对井底岩石的作用力增大，对下井壁的最大动态冲击载荷从−4.89 kN 增大到−6.32 kN 附近。因此，仅从钻头动态冲击载荷来看，单弯单稳螺杆钻具组合和预弯曲动力学钻具组合均满足常规地区防斜要求。

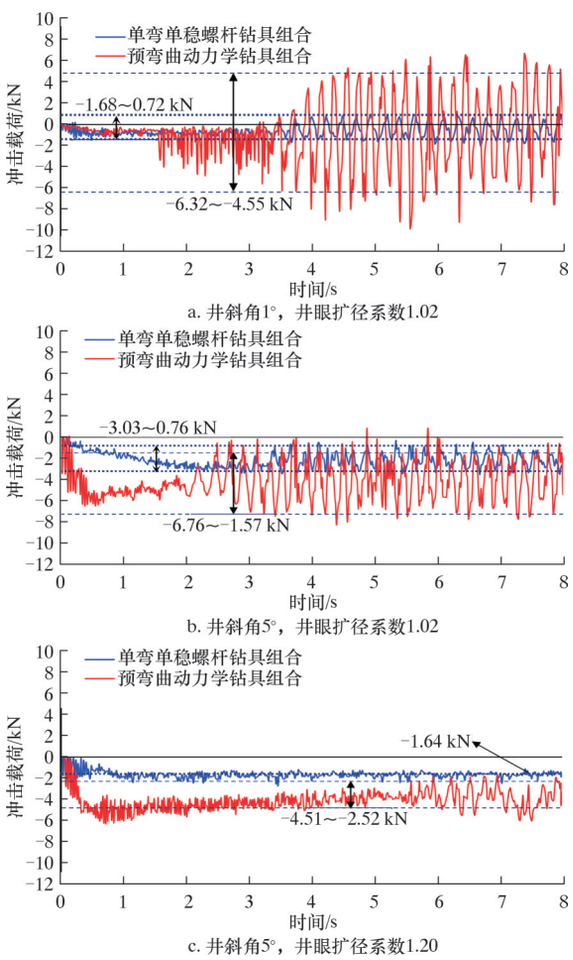


图 8　钻头动态冲击载荷随时间变化规律

Fig. 8　Variation of bit dynamic impact load with time

由图 8b 可知，井斜角增加为 5°时，单弯单稳螺杆钻具组合在 8 s 内钻头动态载荷始终指向下井壁。运动趋于稳定状态后，整体波动范围在−3.03~−0.76 kN 之间；平均钻头动态冲击载荷为−1.21 kN，较井斜角 1°时增大约 0.59 kN，表明井斜角增加时防斜效果明显。预弯曲动力学钻具组合在井斜角增加至 5°时，受重力分量影响较大，初始与单弯单稳螺杆钻具组合一致；随着 2 s 后涡动趋势的逐渐稳定，钻头动态冲击载荷逐渐增大，冲击载荷在−6.76~−1.57 kN 之间动态变化，较井

斜角 1°时指向下井壁方向的作用力更大，防斜效果明显增强。

由图 8c 可知，井斜角为 5°，将井眼扩径系数由 1.02 增加至 1.20 时，2 种钻具组合在大井斜、大井眼扩径情况下的钻头动态冲击载荷均小于 0，即指向下井壁。单弯单稳螺杆钻具组合是由于井眼尺寸增大，在底部钻具组合旋转过程中钻头持续贴于下井壁，而弯螺杆旋转所引起的离心惯性力使得钻头对下井壁的动态冲击载荷处于动态变化中，波动范围在−2.72~−1.57 kN 之间，最终稳定在−1.64 kN 附近。

2.3　上稳定器碰撞力变化

井下钻具中稳定器的外径接近井眼尺寸才能起到扶正效果，而钻进过程中稳定器易因钻柱屈曲变形与井壁发生接触碰撞，存在一定井壁失稳风险[28-29]。为此，对比 2 种钻具组合中上稳定器对井壁的碰撞情况，得到了两者在 8 s 仿真时间内碰撞力随时间的变化曲线（见图 9）。

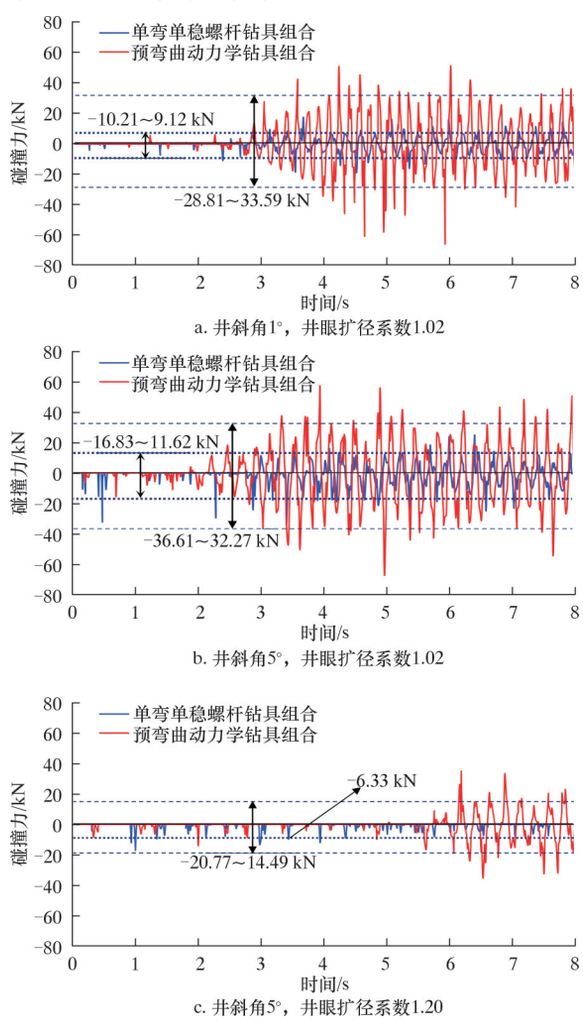


图 9　上稳定器碰撞力随时间变化曲线

Fig. 9　Variation of upper stabilizer collision force with time

由图 9a 可知：井斜角为 1°时，在 0~3 s 内，单弯单稳螺杆钻具组合和预弯曲动力学钻具组合的上稳定器在井斜影响下主要与下井壁发生碰撞；3 s 后钻柱旋转发生反向涡动，上稳定器间断性与上下井壁发生碰撞。单弯单稳螺杆钻具组合的上稳定器对井壁的碰撞力波动范围主要集中在−10.20~9.12 kN，而预弯曲动力学钻具组合的上稳定器对井壁的碰撞力波动范围主要集中在−28.81~33.59 kN，对井壁的冲击碰撞作用约为单弯单稳螺杆钻具组合的 3 倍，不利于维持井壁稳定。

由图 9b 可知：井斜角增加为 5°后，指向下井壁的重力分量增加，2 种钻具组合的上稳定器对于下井壁的碰撞力明显高于上井壁。其中单弯单稳螺杆钻具组合的上稳定器对井壁的碰撞力波动范围主要集中在−16.83~11.62 kN，而预弯曲动力学钻具组合的上稳定器对井壁的碰撞力波动范围主要集中在−36.61~32.27 kN。表明单弯单稳螺杆钻具组合对井斜更为敏感，碰撞力受井斜增加而增大，而预弯曲动力学钻具组合所受影响较小。

由图 9c 可知：井斜角为 5°，将井眼扩径系数由 1.02 增加至 1.20 时（井眼尺寸增加了 34 mm），单弯单稳螺杆钻具组合的上稳定器全程仅与下井壁发生碰撞，且碰撞力较井眼扩径系数为 1.02 时大大减小。井眼扩径系数为 1.02 时，预弯曲动力学钻具组合约在 2.0 s 后形成稳定周向涡动。当井眼扩径系数增至 1.20 时，在 5.7 s 前预弯曲动力学钻具组合尚未形成稳定的涡动，钻具运动主要受重力作用控制导致上稳定器持续与下井壁发生碰撞。随后，随着涡动逐渐增强，上稳定器开始交替碰撞上、下井壁，且两侧碰撞力大小相近。但相较井眼扩径系数为 1.02 的工况稳定涡动时间延后约 3.7 s，碰撞力同样大幅减小。

3　现场应用实例

根据以上研究内容，将成果应用于西部某油田区块的 STX 井，以明确与工程实际的符合情况。考虑预弯曲动力学钻具组合的上稳定器对井壁碰撞力约为单弯单稳螺杆钻具组合的 3 倍，而所应用区块的井壁稳定性差，井眼扩径情况严重。因此选用单弯单稳螺杆更利于井壁稳定，防止井下复杂事故的发生。

计算单弯单稳螺杆钻具组合不同结构下的平均动态冲击载荷和稳定器碰撞力，评估钻具组合的防斜能力和井壁作用力，优选得到 STX 井四开/

五开井段单弯单稳螺杆钻具组合。具体结构为：ø241.3/ø190.0 mm钻头+螺杆+ø177.8/ø158.0 mm钻铤2根+稳定器（欠6~9 mm）+ø177.8/ø158.0 mm钻铤+加重钻杆+钻杆。若井斜角小于5°时可选用直螺杆进行钻进，而井斜角大于5°时，则选用0.50°~0.75°的弯螺杆进行降斜，钻压波动范围为60~80 kN。

选取STX井五开6 700~6 906 m井段，与单钟摆和直螺杆钻具组合的应用效果进行对比分析。地质设计资料表明，该井段处于同一层位，地层岩性无明显变化，地层倾角范围20°~30°，试验结果如图10所示。由图10可知：在井深为6 700~6 774 m时，第一趟采用单钟摆，井斜角由3.01°增加至7.11°。受较大地层倾角和井眼扩径等因素影响，该钻具组合表现出明显的增斜趋势，难以满足防斜要求。第二趟更换为带直螺杆的单钟摆，但低钻压、大井斜条件下仍为增斜钻进趋势，继续钻进26 m后，井斜角迅速增至7.89°，仍不能满足防斜要求。第三趟采用了优化的单弯单稳钻具组合，结构弯角为0.75°，钻进105 m后，采用了高钻压钻进，最大井斜角由7.89°降低至6.71°，降斜效果明显。平均机械钻速较试验前的邻井由1.95 m/h提升至4.17 m/h，提高113.8%，提速效果明显，验证了螺杆防斜钻具组合优化研究的可行性。

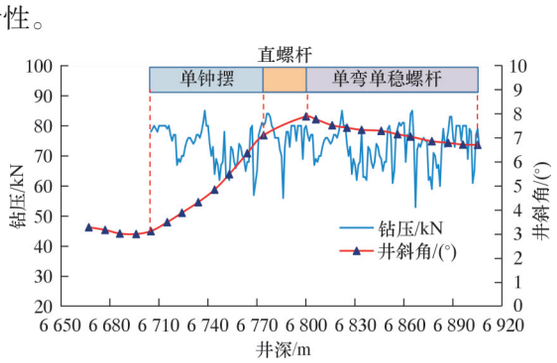


图10　STX井单弯单稳螺杆钻具组合试验结果

Fig. 10　Test results of single-bend single-stabilizer PDM BHA in Well STX

4　结　论

（1）建立了钻柱屈曲变形后与井壁碰撞接触的刚柔耦合仿真模型，该模型能够实现单弯单稳螺杆钻具组合和预弯曲动力学钻具组合的瞬态动力学特性分析。

（2）井斜角由1°增至5°时，单弯单稳螺杆钻具组合钻铤形心轨迹向下井壁偏移，其平均钻头动态冲击载荷增加约0.59 kN。井眼扩径系数由1.02增至1.20后，钻铤形心轨迹不规则并趋向下井壁，钻头动态冲击载荷和上稳定器碰撞力主要指向下井壁，表明该组合在较大井斜和井眼扩径条件下具有较强的防斜能力。

（3）井斜角由1°增至5°时，预弯曲动力学钻具组合的钻铤形心涡动轨迹更加明显，指向下井壁的钻头动态冲击载荷和上稳定器碰撞力均增大。井眼扩径系数由1.02增至1.20后，稳定涡动形成时间延后约3.7 s，最大负向钻头动态冲击载荷及稳定器碰撞力减小，表明其防斜能力减弱。

（4）以平均动态冲击载荷和稳定器碰撞力作为优选评价指标，推荐单弯单稳螺杆钻具组合结构参数；现场应用结果表明，五开最大井斜角降低至6.71°，平均机械钻速提高113.8%，满足超深井直井的防斜打快作业需求。

参　考　文　献

[1]　袁国栋，王鸿远，陈宗琦，等. 塔里木盆地满深1井超深井钻井关键技术［J］. 石油钻探技术，2020，48（4）：21-27.
Yuan Guodong，Wang Hongyuan，Chen Zongqi，et al. Key drilling technologies for the ultra-deep well Manshen 1 in the Tarim Basin［J］. Petroleum Drilling Techniques，2020，48（4）：21-27.

[2]　陆如泉，余功铭，李晓光，等. 2024年全球油气行业勘探开发评述［J］. 世界石油工业，2025，32（1）：1-14.
Lu Ruquan，Yu Gongming，Li Xiaoguang，et al. Review of global oil and gas exploration and development in 2024［J］. World Petroleum Industry，2025，32（1）：1-14.

[3]　成海，张逸群，王印，等. 超深定向井地质工程力学耦合机理研究进展与认识［J］. 油气藏评价与开发，2024，14（4）：593-599.
Cheng Hai，Zhang Yiqun，Wang Yin，et al. Progress and understanding on geology-drilling engineering-mechanics coupling mechanism of ultra-deep directional wells［J］. Petroleum Reservoir Evaluation and Development，2024，14（4）：593-599.

[4]　Zhao Fei，Wang Haige，Cui Meng. Optimizating drilling operating parameters with Real-Time surveillance and mitigation system of downhole vibration in deep wells［C］//IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference，Singapore，2016：SPE-180661-MS.

[5]　汪海阁，黄洪春，毕文欣，等. 深井超深井油气钻井技术进展与展望［J］. 天然气工业，2021，41（8）：163-177.
Wang Haige，Huang Hongchun，Bi Wenxin，et al. Deep and ultra-deep oil/gas well drilling technologies：

progress and prospect [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41 (8): 163-177.

[6] 可艳红. 深井超深井钻井技术的应用探讨 [J]. 石油和化工设备，2018，21 (8)：100-102.
Ke Yanhong. Application of deep well drilling technology [J]. Petro-Chemical Equipment, 2018, 21 (8): 100-102.

[7] 李超，窦亮彬，李振兴，等. 青西油田深井钻井提速技术与应用 [J]. 断块油气田，2018，25 (3)：376-380.
Li Chao, Dou Liangbin, Li Zhenxing, et al. Drilling rate improvement technology for deep wells and its application in Qingxi oilfield [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25 (3): 376-380.

[8] 赵新瑞，姜敬华，奚艳红，等. 井斜控制理论及防斜钻井技术综述 [J]. 钻采工艺，2000，23 (1)：4-9.
Zhao Xinrui, Jiang Jinghua, Xi Yanhong, et al. Summarization on deviation control theory and anti-deflection drilling technology [J]. Drilling & Production Technology, 2000, 23 (1): 4-9.

[9] 纪照生，袁国栋，晁文学，等. 塔里木盆地超深小井眼定向钻井提速提效关键技术 [J]. 石油钻探技术，2024，52 (4)：8-14.
Ji Zhaosheng, Yuan Guodong, Chao Wenxue, et al. Key technology for speeding up and improving efficiency of ultra-deep slim-hole directional drilling in Tarim Basin [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52 (4): 8-14.

[10] 张德龙，郭强，杨鹏，等. 地热井花岗岩地层钻进提速技术研究与应用进展 [J]. 地质与勘探，2022，58 (5)：1082-1090.
Zhang Delong, Guo Qiang, Yang Peng, et al. Progress in research and application of drilling speed-up technology for granite formation in geothermal wells [J]. Geology and Exploration, 2022, 58 (5): 1082-1090.

[11] 李一岚. 顺北超深超高温油气藏钻完井提速关键技术 [J]. 石油钻探技术，2024，52 (3)：21-27.
Li Yilan. Key technologies for improving drilling and completion speed in Shunbei ultra-deep and ultra-high-temperature oil and gas field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52 (3): 21-27.

[12] 宫臣兴，董易凡，何涛，等. 基于机械比能的钻井参数优化方法研究与应用 [J]. 西安石油大学学报（自然科学版），2025，40 (2)：85-94.
Gong Chenxing, Dong Yifan, He Tao, et al. Research and application of drilling parameter optimization method based on mechanical specific energy [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2025, 40 (2): 85-94.

[13] Dong Guangjian, Chen Ping. The vibration characteristics of drillstring with positive displacement motor in compound drilling Part 2: transient dynamics and bit control force analysis [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43 (27): 12189-12199.

[14] 石祥超，焦烨，刘景涛，等. 考虑深井井下动力钻具影响的钻柱粘滑振动规律 [J]. 天然气工业，2024，44 (6)：87-97.
Shi Xiangchao, Jiao Ye, Liu Jingtao, et al. Stick-slip vibration law of drill strings under the influence of mud motors in deep wells [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44 (6): 87-97.

[15] 狄勤丰，王文昌，姚永汉，等. 底部钻具组合动力学模型及涡动特性仿真 [J]. 中国石油大学学报（自然科学版），2010，34 (3)：53-56.
Di Qinfeng, Wang Wenchang, Yao Yonghan, et al. Dynamics model and whirl features' simulation of bottom hole assembly [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34 (3): 53-56.

[16] 钟文建，李双贵，熊宇楼，等. 超深水平井钻柱动力学研究及强度校核 [J]. 西南石油大学学报（自然科学版），2020，42 (4)：135-143.
Zhong Wenjian, Li Shuanggui, Xiong Yulou, et al. The dynamics characteristics and strength check of drilling string in ultra-deep horizontal well [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2020, 42 (4): 135-143.

[17] 刘科柔，张辉，王新锐，等. 双稳定器预弯曲钻具组合防斜特性动力学评价方法 [J]. 石油钻采工艺，2021，43 (3)：281-288.
Liu Kerou, Zhang Hui, Wang Xinrui, et al. Dynamic evaluation method of anti-deflection characteristics of double-stabilizer pre-bending BHA [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43 (3): 281-288.

[18] Kapitaniak M, Vaziri hamaneh V, Páez chávez J, et al. Unveiling complexity of drill-string vibrations: experiments and modelling [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2015, 101-102: 324-337.

[19] 赵润琦. 预探井杨柳 1 井钻井提速关键技术 [J]. 石油钻探技术，2021，49 (5)：26-30.
Zhao Runqi. Key technologies for ROP improvement in exploratory well Yangliu-1 [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49 (5): 26-30.

[20] 刘永升，高德利，王镇全，等. 斜直井眼中钻柱横向动态运动非线性模型研究 [J]. 振动与冲击，2017，36 (24)：1-6.
Liu Yongsheng, Gao Deli, Wang Zhenquan, et al.

Nonlinear dynamic model of drill-string transverse motion in a deviated well [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36 (24): 1-6.

[21] 高德利，黄文君. 井下管柱力学与控制方法若干研究进展 [J]. 力学进展，2021，51 (3)：620-647.
Gao Deli, Huang Wenjun. Some research advances in downhole tubular mechanics and control methods [J]. Advances in Mechanics, 2021, 51 (3): 620-647.

[22] 王恒. 静态推靠式旋转导向 BHA 力学特性及钻进趋势研究 [D]. 青岛：中国石油大学（华东），2019.
Wang Heng. Study on the mechanical characteristics and drilling tendency of a static push-the-bit rotary steerable BHA [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.

[23] 王明杰. 超深井钻柱动力学特性分析及动态安全性评价 [D]. 上海：上海大学，2016.
Wang Mingjie. Drillstring dynamic characteristics analysis and dynamic safety evaluation for ultra-deep well [D]. Shanghai: Shanghai University, 2016.

[24] 刘强，刘铁溟，杨春雷. 匹配旋转导向的螺杆钻具钻柱动力学研究 [J]. 应用力学学报，2021，38 (3)：1272-1279.
Liu Qiang, Liu Yiming, Yang Chunlei. Study on drilling string dynamics of positive displacement motor with rotary steering [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38 (3): 1272-1279.

[25] 吴泽兵，黄海，郑维新，等. 基于机械系统动力学自动分析水平井钻柱-井壁接触仿真分析水平井钻柱-井壁接触仿真分析 [J]. 科学技术与工程，2020，20 (33)：13762-13768.
Wu Zebing, Huang Hai, Zheng Weixin, et al. Contact simulation analysis of horizontal well drillstring-wellbore based on automatic dynamic analysis of mechanical systems software [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20 (33): 13762-13768.

[26] 米光勇，袁和义，王强，等. 四川盆地双鱼石区块深井钻井井斜规律研究 [J]. 西南石油大学学报（自然科学版），2021，43 (4)：62-70.
Mi Guangyong, Yuan Heyi, Wang Qiang, et al. A study on deep well deviation in Shuangyushi block, Sichuan Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2021, 43 (4): 62-70.

[27] 李琴，傅文韬，黄志强，等. 硬地层单牙轮-PDC 钻扩联合钻头破岩特性 [J]. 中国机械工程，2019，30 (22)：2683-2690.
Li Qin, Fu Wentao, Huang Zhiqiang, et al. Rock breaking characteristics of a single cone-PDC combined drill bit in hard formation [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30 (22): 2683-2690.

[28] 童召军，刘恒，栾宝琨，等. 单弯双稳螺杆钻具组合防斜纠斜能力研究 [J]. 钻探工程，2024，51 (5)：145-153.
Tong Zhaojun, Liu Heng, Luan Baokun, et al. Research on the correction and anti-inclination capability of single bend double stable screw drilling tool combination [J]. Drilling Engineering, 2024, 51 (5): 145-153.

[29] 曹华庆，燕建成，龙志平. 川东南页岩气井岩溶浅表层安全高效钻井技术 [J]. 石油钻探技术，2023，51 (2)：22-28.
Cao Huaqing, Yan Jiancheng, Long Zhiping. Safe and efficient drilling technologies for shallow karst strata for shale gas wells in southeast Sichuan [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51 (2): 22-28.

第一作者简介：席传明，高级工程师，生于 1990 年，2016 年毕业于中国石油大学（华东）油气井工程专业，现从事水平井、超深井钻完井技术研究工作。地址：（834000）新疆克拉玛依市。email：xichuanming2017@petrochina.com.cn。

修改回稿日期：2026-03-25
（本文编辑　任　武）