

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2021003

引用格式: 娄尔标, 周波, 刘洪涛, 等. 巨厚砾石层气体钻井井筒不规则性对井斜的影响研究 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(3): 62-66.

LOU Erbiao, ZHOU Bo, LIU Hongtao, et al. Effect of irregular wellbores on well deviation in air drilling through thick conglomerate formations [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(3): 62-66.

巨厚砾石层气体钻井井筒不规则性对井斜的影响研究

娄尔标¹, 周波¹, 刘洪涛¹, 陈锋², 王文昌³, 薛艳鹏¹

(1. 中国石油塔里木油田分公司, 新疆库勒 841000; 2. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072; 3. 上海大学力学与工程科学学院, 上海 200072)

摘 要: 直井易斜和下套管困难是巨厚砾石层气体钻井存在的 2 个亟需解决的问题。现场测试数据表明, 即使使用普遍认为具有较好控斜效果的空气锤钻井技术, 井斜控制依然困难, 且井筒的规则性很差, 这很难用现有的控斜理论解释。现有底部钻具组合 (BHA) 受力模型均未考虑井筒的不规则性, 都假设井筒光滑规则。为此, 基于现场实测数据, 利用有限元方法建立了 BHA 与不规则井筒相互作用的力学模型, 分析了井筒不规则性对 BHA 受力特征的影响。模型分析表明, 不规则井筒易形成附加支点, 缩短有效钟摆长度, 使降斜力大幅减小, 甚至可能使钻头侧向力成为增斜力, 造成井斜控制失败。实例分析证实, 巨厚砾石层采用气体钻井时, 预弯钟摆 BHA 所钻井筒相对较为规则, 控斜效果好, 下套管作业顺利。现场实测数据间接证明了井筒不规则性对井斜存在重要影响, BHA 力学分析时应考虑井筒的不规则性。

关键词: 巨厚砾石层; 气体钻井; 井筒规则性; 井斜; 降斜力

中图分类号: TE242

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2021)03-0062-05

Effect of Irregular Wellbores on Well Deviation in Air Drilling Through Thick Conglomerate Formations

LOU Erbiao¹, ZHOU Bo¹, LIU Hongtao¹, CHEN Feng², WANG Wenchang³, XUE Yanpeng¹

(1. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang, 841000, China; 2. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai, 200072, China; 3. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai, 200072, China)

Abstract: Proneness to well deviation and difficulty in casing running are two bottlenecks to be solved urgently in air drilling through the thick conglomerate formation. Field test data revealed that well deviation control was still challenging even air hammer drilling with a marked control effect on deviation was adopted, and wellbore regularity was poor. This phenomenon is difficult to explain with present theories of deviation control. Existing bottom hole assembly (BHA) force models do not consider the irregularity of the wellbore, and assume that the wellbore is smooth and regular. In this paper, the mechanical model of interaction between the irregular wellbore and BHA was built with finite element method on the basis of field data, and the influence of wellbore irregularity on the mechanical characteristics of BHA was analyzed. The model results demonstrate that the irregular wellbore is easy to form additional fulcrum and shorten the swing distance of pendulum BHA, thus greatly reducing deviation-reducing force. It may even convert the lateral force on the drill bit into a deviation-increasing force, resulting in well deviation control failure. It is confirmed by case analysis that the wellbore drilled by the pre-bent pendulum BHA is regular in air drilling through the thick conglomerate formation, with effective well deviation control and smooth running of casing. Field data indirectly supports the significant impact of wellbore irregularity on well deviation, which should be considered in the BHA mechanical analysis.

收稿日期: 2020-03-19; 改回日期: 2020-12-23。

作者简介: 娄尔标 (1986—), 男, 安徽宿州人, 2010 年毕业于中国石油大学 (华东) 石油工程专业, 2013 年获中国石油大学 (华东) 油气井工程专业硕士学位, 工程师, 主要从事钻井工程钻杆、套管柱等管柱力学学校核设计工作。E-mail: lebgreen@163.com。

通信作者: 陈锋, chenfang536@shu.edu.cn。

基金项目: 国家科技重大专项“深井超深井钻井工程设计系统在塔里木油田现场的应用” (编号: 2016ZX05020-006), 国家自然科学基金项目“超深井钻柱非线性动力学及动态安全性基础理论研究” (编号: U1663205)、“气体钻井中预弯底部钻具组合控斜的非线性动力学机制” (编号: 51704191) 和“超深井油套管螺纹接头三维力学特性分析及密封机理研究” (编号: 51804194), 以及中国石油塔里木油田分公司科技项目“山前超深复杂井钻井技术攻关与应用” (编号: 201017050104) 资助。

Key words: thick conglomerate formation; air drilling; wellbore regularity; well deviation; deviation-reducing force

与钻井液钻井相比, 气体钻井具有机械钻速高、钻头寿命长、储层保护和防漏失效果好等优点^[1-3]。但是, 气体钻井存在 2 个瓶颈问题: 直井易斜和下套管困难^[4-6]。气体钻井中井斜控制难度大, 与地层不均质、底部钻具组合(BHA)振动剧烈和井下情况复杂(如地层出水)等因素有关^[7-11]。对此, 目前公认的比较有效的方法是用空气锤进行钻进, 不但机械钻速快, 而且在砂岩、泥页岩和碳酸盐岩地层中均有很好的井斜控制效果。但在塔里木油田山前巨厚砾石层中采用空气锤钻进, 不但井斜控制难度很大, 后续下套管作业也十分困难, 主要表现为井筒不规则性很差。

现场实践表明, 采用带预弯结构的钟摆 BHA 控斜效果较好, 套管下入也很顺利^[12-13]。目前, 基于预弯钟摆 BHA 的控斜方法已在塔里木油田应用 6 口井, 均取得了成功。但现有 BHA 受力模型都假设井

筒光滑, 没有考虑井筒的不规则性^[14-17], 因此不适合用其分析巨厚砾石层气体钻井井斜机理。为此, 笔者从 BHA 与不规则井筒相互作用的角度出发, 建立了有限元力学模型, 分析了井筒不规则性对井斜的影响, 并以塔里木油田山前地区钻遇巨厚砾石层的某气体钻井为例进行了实例分析, 验证了相关结论的可靠性和准确性。

1 BHA 与井筒相互作用模型

1.1 BHA 与不规则井筒相互作用物理模型

图 1(a)所示为塔里木油田山前地区巨厚砾石层采用空气锤钻井的一口典型井的实际井筒特征。可以看出, 其井筒存在严重的不规则、不光滑现象。据此, 建立了 BHA 与不规则井筒相互作用的物理模型, 如图 1(b)所示。

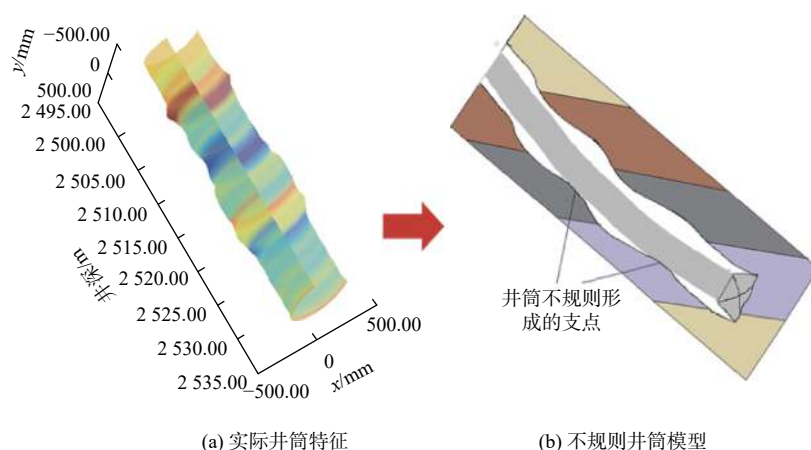


图 1 BHA 与不规则井筒相互作用物理模型

Fig.1 Physical model of interaction between the BHA and the irregular wellbore

由图 1 可知, BHA 会受到不规则井筒的作用。在规则井筒中, BHA 受重力作用的同时得到下井壁的“连续”支撑作用, 可认为“BHA 躺在下井壁上”; 但在不规则井筒中, 下井壁的不规则“凸起”会形成附加支点, 改变 BHA 的受力特征, 减小钻头上的降斜力, 甚至可能在钻头上形成增斜力。

1.2 钻柱井壁摩擦接触模型

在 BHA 与不规则井筒相互作用模型的基础上, 建立了如图 2 所示的钻柱井壁摩擦接触模型。设该模型中: 采用笛卡尔直角坐标系 $O-x-y-z$, z 轴与井眼轴线重合, 在井眼中心建立局部柱坐标系 $o-t-n-z$; Ω_1 代表钻柱, Ω_2 代表井壁, $S^{(m)}$ 代表力

学边界 ($m=1, 2$ 分别表示 2 个接触体); l 表示接触体增量步起始时刻的间隙大小, l 为负表示过盈。

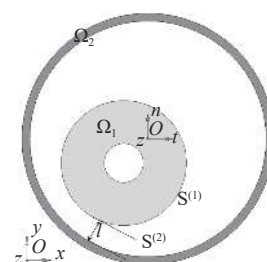


图 2 钻柱井壁摩擦接触模型

Fig.2 Frictional contact model between the drill string and the sidewall

采用罚函数法计算分析摩擦接触问题。在每一个时间步检查各从节点是否穿透主面,如有穿透,则在该从节点与被穿透主面间引入界面接触力,其大小与穿透深度、主面的刚度成正比。用 $\mathbf{p}_c = \{p_T, p_N\}^T$ 表示接触面上的力,用 $o-t-n-z$ 表示接触面的局部坐标系,则接触状态的分离、粘结和滑动3类特征依次表示如下^[18]:

$$u_N^{(1)} - u_N^{(2)} + l > 0 \quad p_N = p_T = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_N^{(1)} - u_N^{(2)} + l = 0 & p_N = -\alpha_N(u_N^{(2)} - u_N^{(1)} - l) \\ |u_T^{(1)} - u_T^{(2)}| = 0 & p_T = -\alpha_T(u_T^{(2)} - u_T^{(1)}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_N^{(1)} - u_N^{(2)} + l = 0 & p_N = -\alpha_N(u_N^{(2)} - u_N^{(1)} - l) \\ |u_T^{(1)} - u_T^{(2)}| > 0 & p_T = -\mu_f |p_N| \text{sign}(u_T^{(2)} - u_T^{(1)}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $u_N^{(m)}, u_T^{(m)}$ 分别为接触点法向增量位移和切向增量位移, m ; p_N, p_T 分别为接触面上的法向力(以压为正)和切向力, N ; μ_f 为滑动摩擦系数; α_N, α_T 分别为法向罚参数和切向罚参数。

1.3 BHA与井筒相互作用有限元计算模型

以单稳定器钟摆钻具组合为例,确定了4种工况:工况1,井筒规则,不弯曲;工况2,井筒有一定程度的弯曲,钻铤在特定位置与井筒相接触(即形成附加支点),但钻铤未发生变形;工况3,井筒有较大幅度的弯曲,钻铤在特定位置与井筒相接触,且由于附加支点的作用钻铤发生了弯曲变形;工况4,井筒的不规则性比工况3更为严重。取钻头(空气锤钎头)外径为431.8 mm,钻铤外径为228.6 mm,钻铤内径为71.4 mm,扶正器外径为428.0 mm,扶正器距钻头27 m,井眼直径为431.8 mm,井斜角为5°,并假定BHA与井筒的摩擦系数为0.2,建立了BHA与井筒相互作用有限元计算模型,如图3所示。

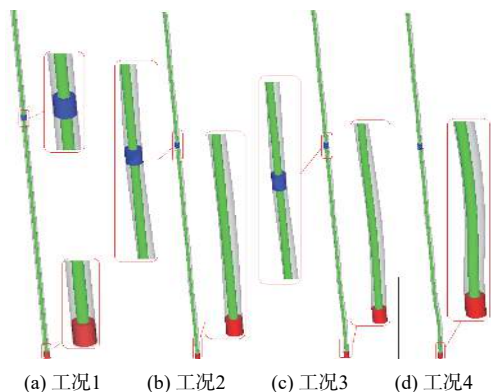


图3 BHA与井筒相互作用有限元计算模型

Fig.3 Finite element model of interaction between the BHA and the wellbore

2 井筒不规则程度对钻头侧向力的影响

采用显式算法模拟BHA与井筒间的相互作用机制,计算分析了井筒不同规则程度对钻头侧向力的影响。该分析包括2个计算分析步:1)对BHA施加重力作用;2)在钻头处施加钻压。

在管柱自重和50 kN钻压作用下(空气密度为 1.29 kg/m^3),工况1—4下钻头对井筒的作用力见表1(负为降斜力,正为增斜力)。

表1 钻头对井筒的作用力
Table 1 Force of the bit on the wellbore

工况	x方向作用力/N	y方向作用力/N	z方向作用力/N
1	-1 708.50	-17.80	-150.50
2	-998.30	-3.30	-87.70
3	-0.10	0.01	0.01
4	7 435.70	56.30	595.50

由表1可知,主要的作用力为x向作用力,即侧向力。对比发现:工况1条件下,由于钟摆效应,钻头降斜力较大,此时钻具组合具有较好的降斜效果;工况2条件下,井筒的不规则性使得其在特定位置形成附加支点,减小了钟摆的摆距,使钻头处的降斜力大幅减小;工况3条件下,不规则井筒使钻柱发生一定变形,进一步减小了BHA的降斜能力;工况4条件下,严重不规则的井筒使钻柱发生较大变形,使钻头处产生较大的增斜力。由此可知,井筒越不规则,钟摆BHA降斜能力越弱,甚至可能变为增斜钻具组合。

图4所示为用矢量图表示的不同工况条件下钻头处的侧向力特征。

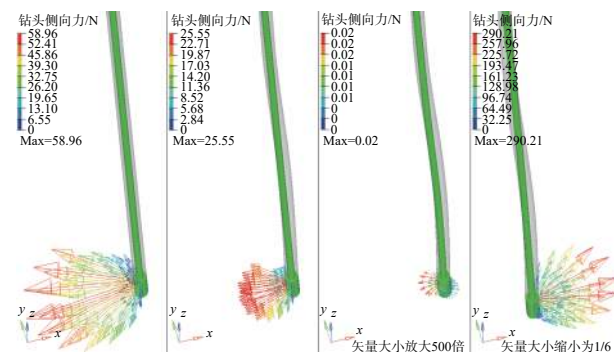


图4 不同工况下的钻头侧向力矢量图

Fig.4 Vector diagram of lateral force on the bit in different cases

由图4可知,井筒的规则程度对钻头侧向力影响很大,在严重不规则井筒中,钻头处会产生增斜力,不利于控制井斜。因此,采用气体钻井钻进含砾岩层等复杂地层时,应尽可能提高井筒的规则性,以更好地控制井斜。

3 实例分析

以塔里木油田山前地区钻遇巨厚砾石层的某井为例,其三开2505.00~2926.00 m井段采用空气锤钻井,井斜角从0.71°增至4.48°,增幅很大;起钻通井后,2926.00~3502.00 m井段采用带预弯结构的钟摆BHA控斜,纯钻时间120.42 h,钻压小于20 kN,转速60 r/min,平均扭矩约4.5 kN·m,且波动幅度很小,井斜角由最大5.20°减至0.63°(3404.00 m处),取得了很好的降斜效果。该井上述井段在钻进中的井斜角随井深的变化情况如图5所示^[12]。

为分析巨厚砾石层气体钻井的井筒特征,利用测井仪器对井径进行了测量。利用三次样条函数对所测井径数据进行处理,可得如图6所示的重构井筒^[13]。图6(a)所示为2700.00~2760.00 m井段的井筒特征,该井段采用空气锤钻进,所用空气锤钻头直径为431.8 mm。由图6(a)可知,该井段的井筒特征随井深的变化情况非常复杂,除椭圆形状

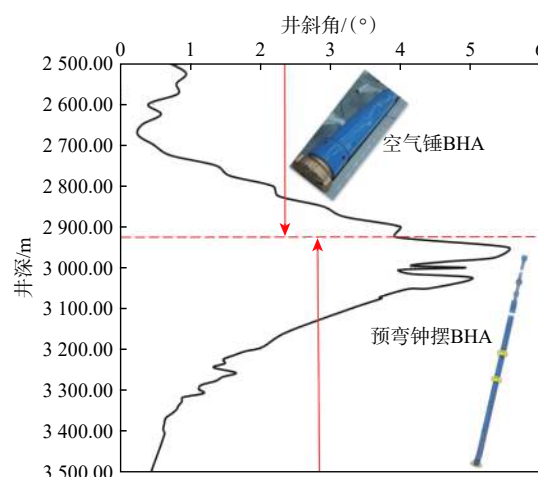


图5 某井钻进砾岩地层时井斜角随井深的变化情况
Fig.5 Variation of the deviation angle with well depth during drilling of a well in the conglomerate formation

十分明显外(长轴的长度508.0 mm,短轴的长度431.8 mm),其上、下截面形状之间的变化差异也很大,存在严重的不规则和不光滑现象。图6(b)所示为3140.00~3200.00 m井段的井筒特征,该井段采用预弯钟摆BHA控斜钻进。由图6(b)可知,该井段的井筒特征相对规则,椭圆度较小。结合图5中井斜数据可知,该井段的井斜角从3.29°减小至1.79°,控制效果显著。

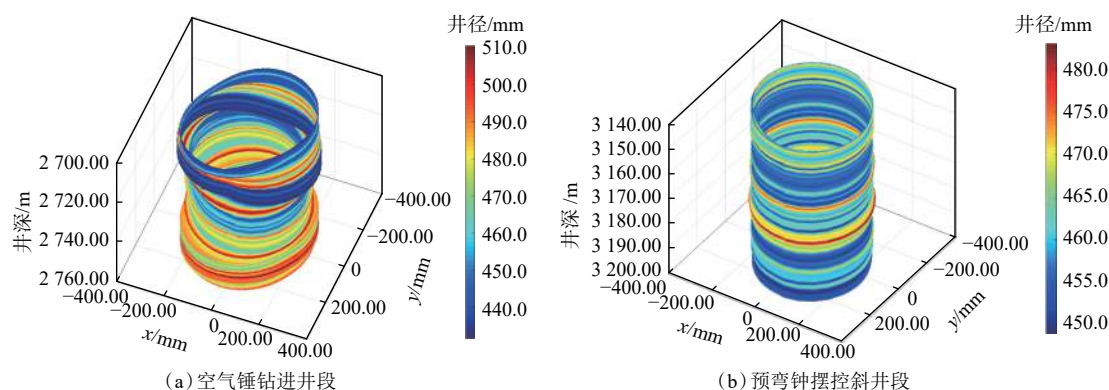


图6 不同井段的井筒特征

Fig.6 Wellbore characteristics in different well sections

由以上分析可知,空气锤钻进井段控斜效果不好,而预弯钟摆BHA钻进井段井斜角减小幅度大,控斜效果显著。这与本文模型分析所得结论相一致:井筒的不规则性增加了井斜控制难度,选择控斜方法时必须考虑井筒规则性对井斜控制效果的影响,并设法提高井筒的规则性。实践表明,预弯钟摆BHA控斜效果好,其中一个重要原因是其可以在一定程度上改变井眼形状,提高井壁的光滑度。

本文BHA受力分析结果与塔里木油田多口井的现场实测数据都能很好地吻合,证明建立的巨厚砾石层气体钻井条件下的BHA与井筒相互作用有限元模型可靠、准确。

4 结论

1) 不规则井筒易形成附加支点,缩短钟摆钻具

组合的摆距,减小钻头上的降斜力。严重不规则井筒可使BHA发生弯曲变形,改变BHA的受力特征,大幅度减小钻头上的降斜力甚至使钻头侧向力成为增斜力。

2)井筒规则程度对BHA的三维受力特征有较大影响,BHA力学分析应考虑井筒不规则性的影响。在含砾岩层等易形成不规则井筒的气体钻井中,选择钻井工具时应充分考虑所钻井筒的规则性。

3)塔里木油田山前地区巨厚砾石层气体钻井实践表明,预弯钟摆BHA可有效改善井眼截面形状,提高井筒的规则性,有利于控制井斜。

参 考 文 献

References

- [1] 肖洲,吴俊,颜小兵,等. 气体钻井技术的发展趋势与新技术探讨[J]. 钻采工艺, 2014, 37(5): 5-7.
XIAO Zhou, WU Jun, YAN Xiaobing, et al. Development trend of gas drilling and discussion on new gas drilling techniques[J]. *Drilling & Production Technology*, 2014, 37(5): 5-7.
- [2] 刘伟,何龙,胡大梁,等. 川南海相深层页岩气钻井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(6): 9-14.
LIU Wei, HE Long, HU Daliang, et al. Key technologies for deep marine shale gas drilling in Southern Sichuan[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(6): 9-14.
- [3] 叶金龙,沈建文,吴玉君,等. 川深1井超深井钻井提速关键技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 121-126.
YE Jinlong, SHEN Jianwen, WU Yujun, et al. Key techniques of drilling penetration rate improvement in ultra-deep Well Chuan-shen-1[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 121-126.
- [4] 杜劲,尹松,闫伟,等. 国内外井斜控制技术的发展[J]. 机械工程师, 2007(2): 22-24.
DU Jin, YIN Song, YAN Wei, et al. The development of well deviation technique at home and abroad[J]. *Mechanical Engineer*, 2007(2): 22-24.
- [5] 张辉,高德利,段明星. 气体钻井井斜机理研究[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(2): 103-105, 109.
ZHANG Hui, GAO Deli, DUAN Mingxing. Research on the mechanism of hole deviation in gas drilling[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2012, 34(2): 103-105, 109.
- [6] 刘彪,杨明合,钟文健,等. 空气钻井井斜因素分析及工艺应用[J]. 断块油气田, 2009, 16(2): 120-123.
LIU Biao, YANG Minghe, ZHONG Wenjian, et al. Factors of affecting borehole deviation for air drilling and the technical application[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2009, 16(2): 120-123.
- [7] 邓柯,刘殿琛,李成晓. 预弯曲动力学井斜控制技术在长宁构造气体钻井中的应用[J]. 钻采工艺, 2020, 43(2): 38-40.
DENG Ke, LIU Dianchen, LI Chengxiao. Application of pre-bending dynamic well inclination control technology in gas drilling in Changning Structure[J]. *Drilling & Production Technology*, 2020, 43(2): 38-40.
- [8] 狄勤丰,胡菲菲,周波,等. 气体钻井预弯曲钟摆钻具控斜的动力学行为[J]. 天然气工业, 2019, 39(7): 94-98.
DI Qinfeng, HU Feifei, ZHOU Bo, et al. Dynamic behaviors of deviation control of the prebent pendulum BHA in gas drilling[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(7): 94-98.
- [9] 曾桂元,代锋,荆华,等. 元坝地区气体钻井井斜控制技术与应用[J]. 钻采工艺, 2015, 38(1): 29-31.
ZENG Guiyuan, DAI Feng, JING Hua, et al. Measures of borehole deviation control during gas drilling in Yuanba Area[J]. *Drilling & Production Technology*, 2015, 38(1): 29-31.
- [10] GAO Deli, ZHENG Deshuai. Study of a mechanism for well deviation in air drilling and its control[J]. *Petroleum Science & Technology*, 2011, 29(4): 358-365.
- [11] ZHAO Zengxin, GAO Deli, ZHENG Deshuai. Mechanism of well deviation in air drilling and its control[R]. SPE 130201, 2010.
- [12] ZHANG He, DI Qinfeng, WANG Wenchang, et al. Lateral vibration analysis of pre-bent pendulum bottomhole assembly used in air drilling[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2018, 24(22): 5213-5224.
- [13] 狄勤丰,王春生,李宁,等. 巨厚砾岩层气体钻井井眼特征[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 372-377.
DI Qinfeng, WANG Chunsheng, LI Ning, et al. Wellbore characteristic of gas drilling in thicker conglomerate[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(3): 372-377.
- [14] 张鹤,狄勤丰,覃光煦,等. 预弯底部钻具组合横向振动响应的快速求解[J]. 石油学报, 2017, 38(12): 1441-1447.
ZHANG He, DI Qinfeng, QIN Guangxu, et al. Quick solution method for lateral vibration response of pre-bent bottom hole assembly[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(12): 1441-1447.
- [15] KAMEL J M, YIGIT A S. Modeling and analysis of stick-slip and bit bounce in oil well drillstrings equipped with drag bits[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2014, 333(25): 6885-6899.
- [16] HUU T N. Study on dynamic stability of drilling string for improved bottom hole assembly and operating drilling parameters to drill wells in the basement[R]. IADC/SPE 180501, 2016.
- [17] LIU Yongsheng, GAO Deli. A nonlinear dynamic model for characterizing downhole motions of drill-string in a deviated well[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 38: 466-474.
- [18] 张洪武,关振群,李云鹏,等. 有限元分析与CAE技术基础[M]. 北京:清华大学出版社, 2004: 54-55.
ZHANG Hongwu, GUAN Zhenqun, LI Yunpeng, et al. Finite element analysis and CAE technology foundation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 54-55.

[编辑 令文学]