

小井眼深层侧钻井钻柱力学分析与应用

杨雪山, 窦正道, 唐玉华, 王媛媛

(中国石化江苏油田分公司石油工程技术研究院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 江苏油田老区挖潜不断深入, 小井眼深层侧钻井增多, 施工难度增大, 针对深层侧钻井特点, 以Cao32C井为例, 分析摩阻系数、井眼轨迹、BHA底部钻具组合等因素对深层侧钻井钻具屈曲的影响, 通过优化钻井液性能, 调整BHA钻具组合, 控制轨迹, 保障了深层侧钻井顺利钻进, 为今后类似井的钻井优化设计和施工提供参考。

关键词: 深层侧钻井; 钻具屈曲; 小井眼; 钻具组合; BHA

中图分类号: TE24 **文献标志码:** A

Application and mechanics analysis of drill string in deep sidetrack wells with small boreholes

YANG Xueshan, DOU Zhengdao, TANG Yuhua, WANG Yuanyuan

(Petroleum Engineering Technology Research Institute of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Yangzhou 225009, China)

Abstract: As a potential exploration in the old area of Jiangsu Oilfield continues to go deeper, the number of small boreholes in deep sidetrack drilling increases and the construction difficulty increases. Taking Cao32C well as an example, the influence of friction coefficient, borehole trajectory, the combination of bottom hole assembly (BHA), and other factors on the buckling of drilling tool in deep sidetrack wells is analyzed according to the characteristics of deep sidetrack drilling wells. The BHA assembly is adjusted to control trajectory by optimizing the drilling fluid's performance. It ensures the smooth drilling of deep sidetrack drilling wells and provides references for the drilling optimization design and construction of similar wells in the future.

Key words: deep sidetrack well; drilling tool buckling; small borehole; drill assembly; bottom hole assembly (BHA)

引用格式: 杨雪山, 窦正道, 唐玉华, 等. 小井眼深层侧钻井钻柱力学分析与应用[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(4): 467-471.

YANG Xueshan, DOU Zhengdao, TANG Yuhua, et al. Application and mechanics analysis of drill string in deep sidetrack wells with small boreholes[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(4): 467-471.

老井开窗侧钻是实现老井产能恢复、挖潜井间层间未动用剩余储量的重要手段, 具有征地少、成本低和见效快等特点^[1-2]。江苏油田通常在 $\varnothing 139.7$ mm套管开窗侧钻, 近年来, 随着老区挖潜不断深入, 深层侧钻井增多, 施工难度增大, 例如Fu125C井开窗点深达3 085.75 m, Cyanchen1-2C井完钻井深达4 068 m, CqinX2井裸眼段长达1 303.92 m。

由于侧钻井井眼小、钻具组合柔性强、实钻轨迹复杂, 相比常规井, 深层侧钻井滑动钻进时, 在井筒约束下, 井下钻柱承受拉、压、弯、扭、液压等多种载荷作用。当管柱上轴向压力达到某一临界值时, 会发生屈曲变形, 附加弯矩与接触力, 使得井下钻柱与井壁之间的摩擦阻力随之增大。当累积摩阻超过钻柱重力产生的下放动力后, 钻柱出现“自锁”现象^[3-5], 对安全高效作业造成威胁。

本文以Cao32C井为例, 开展深层侧钻井滑动钻进时钻柱屈曲研究, 分析摩阻、井眼轨迹、BHA钻具组合等因素对钻柱正弦屈曲的影响规律。这一研究成果可指导深层侧钻井设计优化和现场施工, 规避侧钻井作业过程中遇到的风险。

1 钻具屈曲

1.1 屈曲临界载荷计算

在轴向压力的作用下, 井筒内的钻具管柱将丧失初始直线形状的平衡而过渡到曲线形状的重新平衡, 这一现象称之为丧失稳定, 简称失稳^[3]。管柱

收稿日期: 2023-08-21; 改回日期: 2023-10-18。

第一作者简介: 杨雪山(1985—), 硕士, 现主要从事钻井工程和钻井液技术研究、设计和储层保护工作。E-mail: yangxs.jsyt@sinopec.com。

失稳以后,轴向载荷的微小增加将使管柱屈曲成正弦状(钻柱在井壁上呈正弦或蛇形构型),即发生了正弦屈曲。发生正弦屈曲后,轴向载荷的进一步增加将使管柱正弦屈曲形态的横向变形增加,当轴向载荷达到了另一个临界值时,管柱的屈曲形态将会变成空间螺旋状(钻柱缠绕在井眼内壁上呈螺旋构型),即发生了螺旋弯曲。

根据文献[4-9]可得不同井段管柱屈曲临界载荷公式,据此可以判断不同井段管柱是否发生屈曲。

直井段钻柱屈曲临界载荷:

$$F = \gamma_v (EIq^2)^{1/3} \quad (1)$$

式中, F 代表临界载荷,N; EI 代表钻柱抗弯刚度, $N \cdot m^2$; q 代表钻柱线重, N/m ; γ_v 为无因次参数, $\gamma_v=1.81$ 对应正弦屈曲临界载荷, $\gamma_v=5.25$ 对应螺旋屈曲临界载荷。

稳斜井段钻柱屈曲临界载荷:

$$F = \gamma_i \left(\frac{EIq \sin \alpha}{r_b} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中, α 代表井斜角, $(^\circ)$; r_b 代表钻柱与井眼的径向间隙,为井眼内径与钻柱外径差的一半,m; γ_i 为无因次参数, $\gamma_i=2$ 对应正弦屈曲临界载荷, $\gamma_i=2\sqrt{2}$ 对应螺旋屈曲临界载荷。

弯曲井段钻柱屈曲临界载荷:

$$F = \gamma_{c1} \frac{EIK_b}{r_b} (\gamma_{c2} + (1 + \gamma_{c3} \frac{r_b q \sin \alpha}{EIK_b^2})^{1/2}) \quad (3)$$

式中, K_b 为井眼曲率, m^{-1} ; γ_{c1} 、 γ_{c2} 、 γ_{c3} 为3个无因次参数。

1.2 轴向力计算

侧钻井滑动钻进时,部分钻柱(主要是下部钻具组合BHA)的重力作为钻压施加在钻头上,使得上部钻柱受拉伸而下部钻柱受压缩。除了重力外,钻柱还要承受周向上的扭矩、弯矩、内、外流体对钻具的作用载荷等。

钻柱任一截面处的轴向拉力可按式计算:

$$F_m = K_B (\sum q_i L_i) \sin \theta - F_f - F_d \quad (4)$$

式中, K_B 为浮力系数; q_i 为钻杆或钻铤等线重, kN/m ; L_i 为钻杆或钻铤等长度,m; θ 为井斜角, $(^\circ)$; F_f 为摩擦力,kN; F_d 为滑动钻进时动载,kN。

2 深层侧钻井实例计算与分析

Cao32C井是江苏油田一口利用Cao32老井从 \varnothing

139.7 mm 套管开窗侧钻深井(见图1、图2),井身结构为 $\varnothing 339.7 \text{ mm} \times 81.46 \text{ m} + \varnothing 139.7 \text{ mm} \times 2\,793.83 \text{ m}$ 。由于Cao32老井已侧钻一次(悬挂器顶深2 054.50 m),在直井段2 048 m处开窗,设计井深3 407.26 m,裸眼段长1 359.26 m,最大井斜 13.58° ,2 106.54 ~ 3 407.26 m为稳斜段(见表1)。

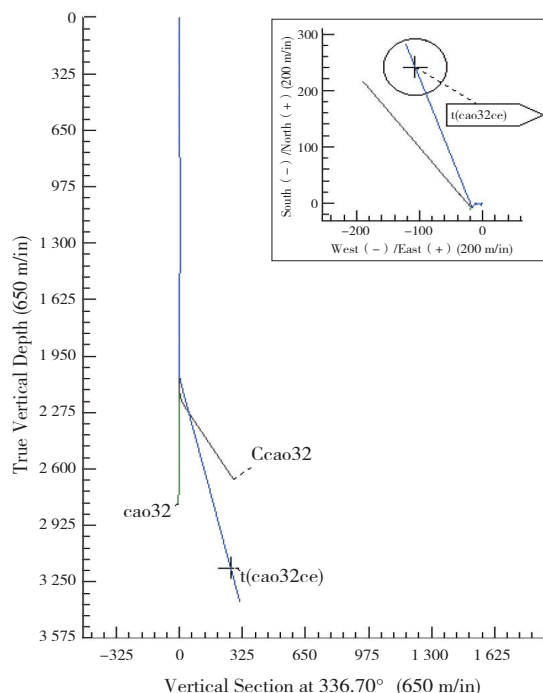


图1 Cao32C井垂直、水平投影

该井钻进至2 925 m,钻具组合: $\varnothing 79.4 \text{ mm}$ 钻杆+ $\varnothing 89 \text{ mm}$ 加重钻杆2根+ $\varnothing 93 \text{ mm}$ 无磁钻杆+定向接头+止回阀+ $\varnothing 95 \text{ mm} 1.25^\circ$ 螺杆+ $\varnothing 118 \text{ mm}$ 钻头。受地层影响,复合钻进有降斜的趋势,需要增斜调整轨迹中靶,但滑动钻进时托压、粘卡严重,上提摩阻最大15 t,上提悬重90 ~ 95 t,定向困难。

2.1 钻井液性能评价

现场钻井液性能测试:密度为 1.29 g/cm^3 ,塑性黏度为 $17 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,动切力 3.6 Pa ,API滤失量 3.1 mL ,高温高压滤失量 13 mL ,固相含量为 17% ,油含量为 2% ,极压润滑系数 0.21 ,滑块润滑系数 0.12 。

由于钻井液中油含量较低,润滑性能较差,加上在上部2 457 ~ 2 756 m(三垛组)钻遇低压油层,岩性为高渗砂岩(渗透率在 $200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上),渗透性好,钻具在井内与地层的吸附性强,导致摩阻较高,上提摩阻15 t,由于钻具尺寸小,刚性弱,存在“黏滞—滑动”现象^[10],定向钻进时托压、粘卡严重,工具面不稳,不得不通过加大钻压稳定钻头工具面。

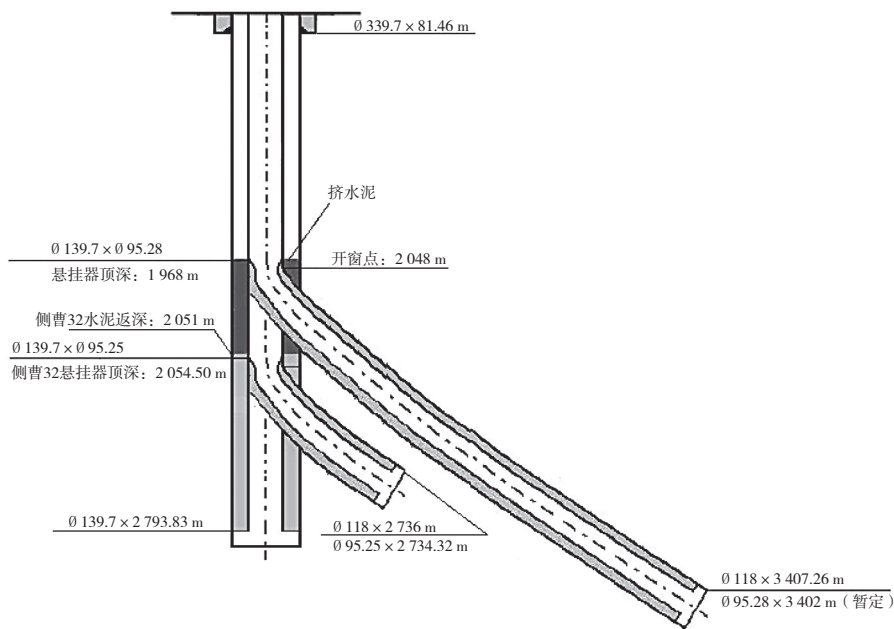


图2 Cao32C 井井身结构

表 1 Cao32C 井眼剖面设计

井深/m	井斜/(°)	方位/(°)	垂深/m	南北/m	东西/m	视位移/m	全角变化率/((°)·100m ⁻¹)
2 048.00	0.85	307.46	2 047.71	-7.06	-16.51	0.05	0.00
2 106.54	13.58	340.03	2 105.67	-0.31	-19.21	7.32	22.00
3 201.50	13.58	340.03	3 170.00	241.41	-107.04	264.06	0.00
3 407.26	13.58	340.03	3 370.00	286.83	-123.54	312.31	0.00

2.2 钻具屈曲模拟

按井深 2 925 m,裸眼段长 886.33 m 计算,根据软件模拟,滑动钻进时,当钻压加到 30 kN 时,钻具底部发生正弦屈曲,继续加压到 50~80 kN,钻具下部发生正弦屈曲并段变长,甚至出现螺旋屈曲(见图 3,黄色代表钻具发生正弦屈曲,红色代表钻具发生螺旋屈曲)。

模拟表明,通过加大钻压,稳定钻头工具面,反而导致钻具正弦屈曲井段增长,甚至出现螺旋屈曲,钻具下压的动力消耗到钻具变形上,钻压难以传递到钻头,导致定向更加困难。现场钻压加到 100 kN 后,定向钻进没有进尺,上提到 100 t 才能拉开钻具(正常上提 60 t),表明井筒内钻具发生屈曲或“自锁”情况。

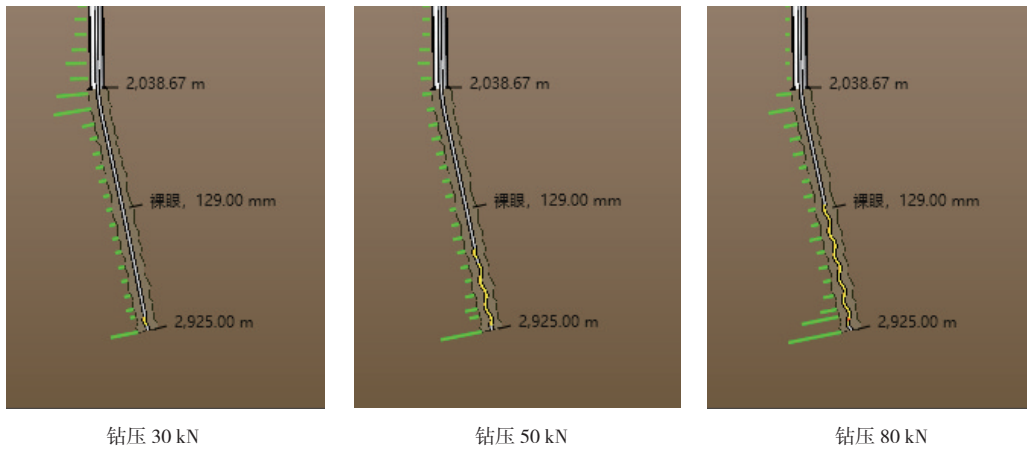


图3 Cao32C 钻柱分析模拟

2.3 井眼轨迹对临界钻压的影响

根据前人研究^[3-5],当钻具某处轴向力大于屈曲载荷时,钻具开始发生正弦屈曲时的钻压为正弦屈曲临界钻压,钻具开始发生螺旋屈曲时的钻压为螺旋屈曲临界钻压。正弦屈曲临界钻压表现为钻柱轴向力与正弦屈曲载荷曲线相交时井底钻具上的钻压。侧钻井由于钻具柔性强,发生正弦屈曲会导致定向失败。

通过计算,Cao32C井设计轨迹正弦屈曲临界钻压6.23 t,实钻轨迹由于地层自然降斜而调整轨迹(见表2),井眼轨迹不平滑,井眼曲折度高,在2 886.86 m井斜急剧下降,由10.55°下降到9.35°,狗腿度达到6.18~6.81°/100 m,2 886.86~2 906.27 m正弦屈曲临界钻压由46.8 kN下降到23.7 kN(见图4),正弦屈曲钻压下降到29.6 kN,实钻钻压30 kN以上时导致钻柱发生屈曲。

表2 Cao32C井实钻轨迹(2 780.14~2 925.68 m)

井深/m	井斜/(°)	方位/(°)	垂深/m	南北/m	东西/m	视位移/m	全角变化率°/(°)·100m ⁻¹
2 780.14	11.07	341.07	2 764.72	126.25	-72.84	145.63	0.83
2 799.55	11.03	340.77	2 783.77	129.77	-74.05	149.31	0.36
2 818.99	11.07	340.17	2 802.85	133.28	-75.30	153.00	0.63
2 848.08	10.96	344.77	2 831.41	138.58	-76.97	158.47	3.04
2 867.46	10.76	346.27	2 850.44	142.11	-77.89	162.02	1.79
2 886.86	10.55	345.87	2 869.50	145.59	-78.75	165.51	1.15
2 906.27	9.35	345.67	2 888.62	148.84	-79.57	168.77	6.18
2 925.68	9.96	352.67	2 907.76	152.04	-80.18	171.88	6.81

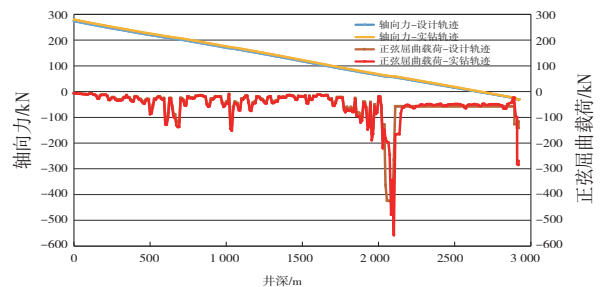


图4 Cao32C井实钻轨迹对临界钻压的影响
(井深2 925 m,钻压30 kN)

2.3.1 井斜角对临界钻压的影响

以完钻井深3 000 m为例,图5展现了稳井段正弦屈曲临界钻压与井斜角之间的非线性变化关系,随着井斜角的增大,临界钻压增加,但临界钻压增加幅度却在不断下降。井斜角小于40°时,正弦屈曲临界钻压受井斜角变化影响大。当井斜角较小时,临界钻压亦较低,滑动钻进更易受到自然降斜井段影响,导致钻具屈曲。井斜角较大时,临界钻压较高,滑动钻进受到自然降斜井段影响较小。因此,深层侧钻井稳斜段井斜不宜过小,宜控制在20~30°左右。

2.3.2 井眼曲率对临界钻压的影响

从公式(3)可以得出,随着井眼曲率增大,增斜段会导致屈曲临界钻压增加,而降斜段会导致屈曲临界钻压下降。以Cao32C井实钻轨迹为例,分析在

2 886.86 m以不同井眼曲率降斜对临界钻压影响,图6显示降斜井段正弦屈曲临界钻压与井眼曲率之间的变化关系,随着井眼曲率的增大,临界钻压降低,但井眼曲率大于6°/100 m,临界钻压变化幅度变缓,因此,深层侧钻井稳斜段应控制好轨迹,轨迹以微增和稳斜为主,降斜井段井眼曲率不宜过大,控制在3°/100 m以内为宜。

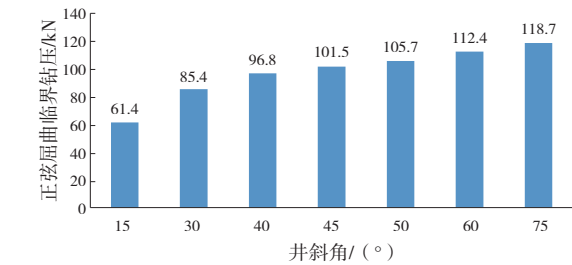


图5 滑动钻进时井斜角和正弦屈曲临界钻压关系

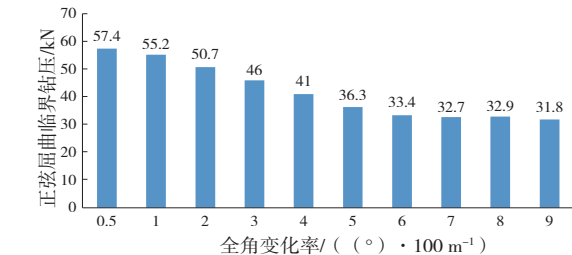


图6 滑动钻进时降斜段井眼曲率与正弦屈曲临界钻压关系

2.4 BHA钻具组合对临界钻压的影响

由于侧钻井井眼小,一般采用加重钻杆代替钻

铤,钻具组合刚性较常规井弱,Cao32C井钻进时,由于上部2 457~2 756 m(三垛组)钻遇低压高渗透砂岩油层,粘卡严重(上提摩阻30 t),简化BHA底部钻具组合,导致钻具刚性弱。

从公式(2)、公式(3)可以得出,采用高抗弯刚度钻柱可以增大临界载荷。根据计算,通过增强下部钻具组合刚性,将底部钻具组合加重钻杆由2根增加至6根,临界钻压由29.6 kN上升到57.7 kN。

3 现场应用

Cao32C井套管开窗侧钻施工采用以下措施:

(1)优选高效润滑剂和封堵剂,采用极压润滑剂代替KD-21C,利用多尺度封堵剂封堵高渗砂岩段,提高泥饼质量,增强钻井液润滑性;

(2)增强BHA底部钻具组合刚性,加重钻杆增加至6根;

(3)控制好轨迹,轨迹以微增和稳斜为主,避免降斜段狗腿度过大。

钻井液性能调整后,极压润滑系数由0.21下降到0.15,滑块润滑系数由0.12下降到0.08;BHA底部钻具组合中加重钻杆增加至6根,提高底部钻具刚性,确保钻压有效传递;实钻中控制轨迹以微增和稳斜为主,降斜狗腿度不超过3°/100 m,顺利钻进至3 410 m(垂深3 370 m)完钻,未再出现严重托压问题。

4 结论与建议

(1)相比常规井,侧钻小井眼钻具组合柔性强、全角变化率大、实钻轨迹复杂,深层侧钻井滑动钻进时,更易发生钻具屈曲,应重视钻具屈曲分析,优化BHA底部钻具组合。

(2)深层侧钻井应重视钻井液封堵性能和润滑性能,防止滑动钻进时,粘卡增大钻压导致钻具屈曲。

(3)深层侧钻井稳斜段井斜不宜过小,宜控制在20~30°左右,自然降斜井眼曲率不宜过大,为现场钻压控制提供更大空间。

参考文献:

- [1] 黄万龙,饶开波,高学生,等.大港油田侧钻井提速技术研究与现场试验[J].长江大学学报(自科版),2015,12(25):42-45.
- [2] 高立军,王广新,郭福祥,等.大庆油田小井眼开窗侧钻水平井钻井技术[J].断块油气田,2008(4):94-96.
- [3] 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.
- [4] 高德利,黄文君,刘永升,等.钻柱力学与套管磨损预测若干研究进展[J].石油管材与仪器,2020,6(4):1-9.
- [5] 高德利.油气井管柱力学与工程[M].东营:中国石油大学出版社,2006.
- [6] 陈庭根,管志川.钻井工程理论与技术[M].东营:石油大学出版社,2000.
- [7] HE X J, KYLLINGSTAD A. Helical buckling and Lock-Up conditions for coiled tubing in curved wells [J]. SPE Drilling & Completion, 1995, 10(1): 10-15.
- [8] QUI W Y, MISKA S, VOLK L. Drill pipe/coiled tubing buckling analysis in a hole of constant curvature [C]//SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference. Midland: SPE, 1998: SPE-39795-MS.
- [9] WU J, JUVKAM H C. The effect of wellbore curvature on tubular buckling and lockup [J]. Journal of Energy Resources Technology, 1995, 117(3): 214-218.
- [10] 韩春杰,阎铁.大位移井钻柱“粘滞-滑动”规律研究[J].天然气工业,2004,24(11):58-60.

(编辑 韩 枫)