◀钻井技术与装备▶

超深井钻铤螺纹应力分布及载荷敏感度模拟研究*

邝献任[1] 崔永兴[2] 田 明[2] 杜 洋[3] 唐佳鑫[2]
（1. 中国石油集团工程材料研究院有限公司 2. 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司
3. 中国石油大学（华东）机电工程学院）

邝献任，崔永兴，田明，等. 超深井钻铤螺纹应力分布及载荷敏感度模拟研究［J］. 石油机械，2026，54（9）：19-28.

Kuang XianRen，Cui YongXing，Tian Ming，et al. Numerical simulation on thread stress distribution and load sensitivity of drill collars in ultra-deep wells［J］. China Petroleum Machinery，2026，54（9）：19-28.

摘要：钻铤作为连接钻柱与钻头的关键传力构件，在万米级深井极端载荷作用下存在瞬时强度失效与疲劳断裂风险，制约着安全高效钻进。为了研究万米深井钻铤螺纹的应力分布及载荷敏感性，对万米深井钻铤服役工况下的扭矩、钻井液压力、轴向载荷及弯矩载荷进行计算，进而建立包含真实螺纹结构的三维实体钻铤有限元模型；研究高弯矩作用下外螺纹根部的应力分布特征及强度失效机制，量化钻铤上扣过程与正常钻探工况的应力集中特性；研究扭矩波动与交变弯矩对内、外螺纹应力幅的影响规律，提出钻铤应力水平对扭矩与弯矩的敏感度量化指标，并构建应力预测敏感度曲线。研究结果表明：大的弯矩载荷将导致钻铤强度失效，螺旋屈曲产生的弯矩（336.3 kN·m）使外螺纹根部应力达993.23 MPa，接近材料抗拉强度，存在瞬时失效风险；扭矩波动（11.3~32.2 kN·m）与交变弯矩（±6.6 kN·m）分别产生11.7与9.8 MPa局部应力幅，在上扣残余应力的叠加影响下，将引起塑性累积应变，加速疲劳失效；在小弯矩作用下，扭矩波动对疲劳损伤的影响更为显著。研究结果可为万米级超深井钻铤设计、安全作业及断裂预防措施制定提供理论支撑。

关键词：万米深井；钻铤；螺纹应力；载荷敏感度；交变弯矩；扭矩波动；应力幅

中图分类号：TE924 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202506036

Numerical Simulation on Thread Stress Distribution and Load Sensitivity of Drill Collars in Ultra-Deep Wells

Kuang Xianren[1] Cui Yongxing[2] Tian Ming[2] Du Yang[3] Tang Jiaxin[2]
（1. *CNPC Tubular Goods Research Institute*; 2. *PetroChina Tarim Oilfield Company*; 3. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *China University of Petroleum* (*East China*)）

Abstract: Drill collar, a key force-transmission component connecting the drill string and the drill bit, is susceptible to instantaneous strength failure and fatigue failure under the extreme loads in wells deeper than 10,000 m, which restrict safe and efficient drilling. To investigate the stress distribution and load sensitivity of drill collar threads in wells deeper than 10,000 m, the torque, drilling fluid pressure, axial load and bending moment of drill collars under service conditions in such wells were calculated, and a three-dimensional solid finite element model of the drill collar featuring the real thread structure was established. The stress distribution characteristics and strength failure mechanism of the external thread root under high bending moments were analyzed, and the stress concentration characteristics of the drill collar during the make-up process and under normal drilling conditions

* 基金项目：中国石油天然气集团有限公司前瞻性基础性项目“油气田管材失效机理及健康服役新技术研究”（2025DJ106）；中国石油天然气股份有限公司技术开发项目“175 MPa特高压井口及配套装备研发”（2022ZG15）。

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

were quantified. The influences of torque fluctuation and alternating bending moment on the stress amplitudes of the internal and external threads were identified, the quantitative sensitivity indexes of drill collar stress levels to torque and bending moment were proposed, and the stress prediction sensitivity curves were constructed. The results show that a large bending moment may cause strength failure of the drill collar. The bending moment (336.3 kN·m) generated by helical buckling makes the stress at the external thread root reach 993.23 MPa, close to the tensile strength of the material, implying a risk of instantaneous failure. The torque fluctuation (11.3–32.2 kN·m) and the alternating bending moment (±6.6 kN·m) produce local stress amplitudes of 11.7 MPa and 9.8 MPa, respectively, which, together with the make-up residual stress, will cause cumulative plastic strain and accelerate fatigue failure. Under small bending moments, torque fluctuation has more significant effect on fatigue damage. The research findings provide theoretical support for the design, safe operation, and failure prevention of drill collars for 10,000-m ultra-deep wells.

Keywords: 10000-meter deep well; drill collar; thread stress; load sensitivity; alternating bending moment; torque fluctuation; stress amplitude

0　引　言

随着全球油气资源需求持续增长，深层油气勘探逐步向万米超深井领域推进。钻铤作为连接钻柱与钻头的关键传力构件[1]，在深部复杂地质环境中承受着极端扭矩、弯矩、轴向力及钻井液压力的多场耦合作用[2]，制约着超深井安全高效钻进。为此，开展万米深井下的载荷计算及有限元应力分析，对保障我国万米超深井工程安全具有重要的现实意义。

近年来，国内外学者针对钻铤应力分析开展了系统性研究。龙尧等[3]基于有限元分析对深度2 000 m以内的钻铤进行了研究，揭示了钻铤长度和截面参数对振动特性的影响规律。Ni等[4]通过多体动力学模型实现了钻柱涡动状态的扭矩-弯矩耦合分析，并分析其对钻铤疲劳寿命的影响。张玉霖等[5]进一步通过现场数据验证了横向振动与疲劳失效的关联性。然而当前大多数研究对钻铤进行了简化，采用实体建模的研究较少。此外，曲豪等[6]开展了钻铤接头的力学特征分析，尽管其对螺纹结构进行了实体建模，但未对万米深井下的实际外载荷进行详细分析。深井钻铤在服役过程中存在载荷波动等问题，极易引起钻铤的疲劳与断裂[7]。先前大量失效案例表明，钻铤螺纹连接处的应力集中位置是疲劳失效的危险点[5, 8]，钻铤屈曲和高频扭矩波动则是服役工况下的主要波动外载[9]。Chu等[10]分析了钻柱屈曲引起的横向载荷波动，提出了横向载荷波动下钻柱钻进的应力分析方法。Zhandayev等[11]利用有限元分析方法，确定了高弯曲应力是钻铤断裂的原因之一。Zhu等[12]和Qu等[13]研究了超深井的扭矩、超深井钻铤连接处的应力特性。Ambrus等[14]分析了不同扭矩下的钻铤特性。Huang等[15]和Chen等[16]在扭转特性的基础上开展了不同扭矩波动下的钻铤应力研究。尽管现有研究取得显著进展，但仍存在以下问题亟待解决：现有有限元模型多基于理想化假设，对实际螺纹结构以及万米深井下的载荷状态缺乏定量分析；针对万米深井钻铤的载荷敏感性分析尚未见报道。

基于此，笔者对万米深井钻铤服役工况下的扭矩、钻井液压力、轴向载荷及弯矩载荷进行计算，进而建立包含真实螺纹结构的三维实体钻铤有限元模型。基于该模型系统开展以下研究：高弯矩作用下外螺纹根部的应力分布特征及强度失效机制，量化钻铤上扣过程与正常钻探工况的应力集中特性；扭矩波动与交变弯矩对内、外螺纹应力幅的影响规律，提出钻铤应力水平对扭矩与弯矩的敏感度量化指标，并构建应力预测敏感度曲线，实现应力快速预测。研究结果可为万米级超深井钻铤设计、安全作业及断裂预防措施制定提供理论支撑。

1　研究对象与服役工况

研究对象为我国西部某油气井。该井设计井深11 100 m，工程现场发现钻铤外螺纹接头连接处易发生断裂，钻铤材料为40CrMnMo。所研究钻铤下方钻具组合为PDC钻头、双内接头和钻铤（见图1）。钻具组合尺寸参数如表1所示，钻铤螺纹参数如表2所示。

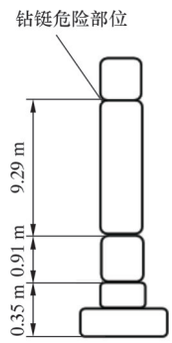


图 1　断裂危险位置钻具组合示意图

Fig. 1　Potential failure position of the drill string assembly

表 1　钻铤断裂面下方钻具组合尺寸参数

Table 1　Dimension parameters of the drill string assembly below the drill collar fracture surface

钻具名称	外径/mm	内径/mm	单根长/m	钻具累长/m
ø241.3 mm PDC 钻头	241.3	72	0.35	0.35
双内接头	202.0	72	0.91	1.26
ø177.8 mm 钻铤	177.8	71	9.29	10.55

表 2　钻铤螺纹参数

Table 2　Parameters of drill collar threads

内、外螺纹牙型	螺距/mm	螺纹锥度	外螺纹锥部长度/mm	内螺纹锥部长度/mm
V-0.038R	6.35	1∶6	124.84	125.00

2　钻铤外载荷计算

2.1　钻铤扭矩及内、外表面压力计算

钻铤扭矩由顶驱扭矩决定，井上扭矩为 50 kN·m，正常钻探过程扭矩最大为 32.2 kN·m。钻铤内、外表面压力载荷p_i、p_o主要受泵压与万米深度钻井液压力影响。其计算式如下：

$$\begin{cases} p_i = p_{i,b} + p_m g(h - L_z) \\ p_o = p_{o,b} + p_m g(h - L_z) \end{cases} \tag{1}$$

$$p_{i,b} = p_b \times \left(1 - \frac{h - L_z}{2h}\right) \tag{2}$$

$$p_{o,b} = p_b \times \left(1 - \frac{h + L_z}{2h}\right) \tag{3}$$

式中：$p_{i,b}$、$p_{o,b}$分别为钻铤内、外表面泵压，MPa；ρ_m为钻井液密度，取值为 1 465 kg/m^3；p_b为最大泵压，取值为 35.7 MPa；h为井深，值为 10 008.97 m；L_z为钻具累长，为 10.55 m。

2.2　轴向载荷计算

为确定深井钻铤轴向载荷方向，需建立钻铤与钻柱中性点的位置关系。基于 Lubinski 理论，钻头至中性点的距离L_N可通过下式计算：

$$L_N = \frac{\boldsymbol{W}}{(\rho_s - \rho_m)gA_s} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{W}$为钻压，取值为 100 000 N；ρ_s为钻铤材料密度，取值为 7 850 kg/m^3；A_s为钻铤横截面积，m^2。

由式（4）计算得L_N为 75 m，则目标钻铤位于中性点下方。钻铤及其断裂面下方钻具结构受力如图 2 所示。断裂面以下钻具处于压缩状态，受以下载荷作用：轴向压缩力$\boldsymbol{F}$、结构重力$\boldsymbol{G}_2$、钻铤–钻具台肩压力$\boldsymbol{F}_P$及钻压$\boldsymbol{W}$。基于力平衡方程，可获得轴向力计算式如下：

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_P + \boldsymbol{W} - \boldsymbol{G}_2 \tag{5}$$

$$\boldsymbol{F}_P = \sum_{i=1}^{3} F_{Pi} = \sum_{i=1}^{3} \rho_m g h_i A_i \tag{6}$$

$$G_2 = \sum_{i=1}^{3} \boldsymbol{T}_i = \sum_{i=1}^{3} \rho_s g V_i \tag{7}$$

式中：$i \in \{1, 2, 3\}$，表示钻铤断裂面下方 3 个台肩位置；$\boldsymbol{F}_{Pi}$为各台肩作用力，N；h_i为各台肩所处深度，m；A_i为各台肩的面积，m^2；$\boldsymbol{T}_i$为钻具不同位置的重力，N；V_i为钻具不同位置的体积，m^3。

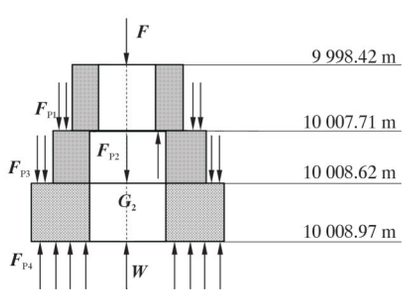


图 2　钻铤及其断裂面下方钻具结构受力示意图

Fig. 2　Stress diagram of drill collar and the drill string assembly below the fracture surface

2.3　弯矩载荷计算

钻铤所受弯矩载荷为井眼曲率产生的弯矩和屈曲产生的弯矩的叠加，因此需分别求解。

2.3.1　井眼曲率产生的弯矩

将钻铤看作外半径为R_o、内半径为R_i的厚壁筒体，可由下式得经验曲率产生的弯矩$\boldsymbol{M}_a$：

$$\boldsymbol{M}_a = \frac{EI}{R_c} \tag{8}$$

$$I = \frac{\pi}{4}(R_o^4 - R_i^4) \tag{9}$$

$$R_c = \frac{180^\circ}{\pi\kappa} \tag{10}$$

式中：E为钻铤材料的弹性模量，取 210 GPa；I为钻铤截面惯性矩，m^4；R_c为井眼曲率半径，m；κ（即狗腿度）为井深 10 008.97 m 处的井眼曲率，数值为每 30 m 0.605°。

2.3.2　屈曲产生的弯矩

钻铤屈曲状态判定是弯矩计算的前提，基于Lubinski无摩擦系统理论，一阶（$\boldsymbol{W}_{\mathrm{cr,\ I}}$）、二阶屈曲（$\boldsymbol{W}_{\mathrm{cr,\ II}}$）临界钻压按式（11）计算。直井螺旋屈曲临界力$\boldsymbol{F}_{\mathrm{c}}$按式（13）计算。

$$\begin{cases}\boldsymbol{W}_{\mathrm{cr,\ I}} = 1.94 w_{\mathrm{bp}} m \\ \boldsymbol{W}_{\mathrm{cr,\ II}} = 3.75 w_{\mathrm{bp}} m\end{cases} \tag{11}$$

$$m = \sqrt[3]{\frac{EI}{w_{\mathrm{bp}}}} \tag{12}$$

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{c}} = 4.05\sqrt[3]{EIw_{\mathrm{bp}}^2} \tag{13}$$

式中：w_{bp}为钻井液单位长度钻铤的浮重，取值1 332.5 N/m；m为特征长度参数，m。

经计算，发生一阶屈曲的临界钻压$W_{\mathrm{cr,\ I}}$为49.9 kN，发生二阶屈曲的临界钻压$\boldsymbol{W}_{\mathrm{cr,\ II}}$为96.4 kN，发生螺旋屈曲的临界力$\boldsymbol{F}_{\mathrm{c}}$为104 kN。基于现场采集的钻压载荷谱分析，实际工况中仅个别时段达到螺旋屈曲临界载荷，其余时段按二阶屈曲开展后续力学分析。

正弦屈曲（含一阶、二阶）弯矩$\boldsymbol{M}_{\mathrm{b1}}$与螺旋屈曲弯矩$\boldsymbol{M}_{\mathrm{b2}}$分别按式（14）和式（15）计算，二阶屈曲总弯矩按式（16）计算，螺旋屈曲总弯矩按式（17）确定。

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{b1}} = \lambda w_{\mathrm{bp}} m r_{\mathrm{c}} \tag{14}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{b2}} = EI\kappa_p \tag{15}$$

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{M}_{\mathrm{a}} + \boldsymbol{M}_{\mathrm{b1}} \tag{16}$$

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{M}_{\mathrm{a}} + \boldsymbol{M}_{\mathrm{b2}} \tag{17}$$

$$\kappa_{\mathrm{p}} = \frac{180^{\circ}}{\pi} \times \frac{4\pi^2 r_{\mathrm{c}}}{\dfrac{8\pi EI}{\boldsymbol{F}} + 4\pi^2 r_{\mathrm{c}}^2} \tag{18}$$

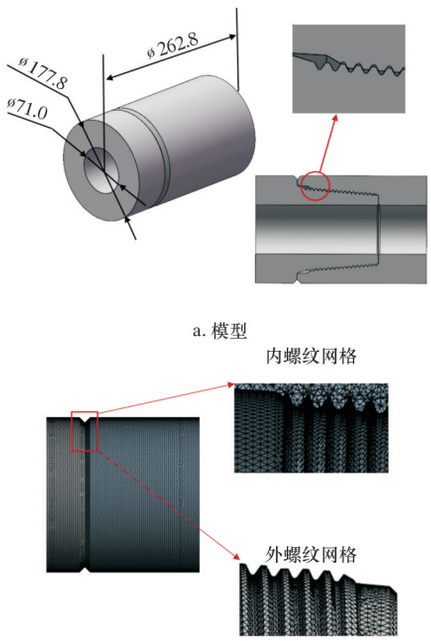
式中：λ为弯曲系数，取值为1.4；r_{c}为表观半径，即钻铤外壁和井眼内壁的间隙半径，这里取值为0.068 m；κ_{p}为发生螺旋屈曲时的钻柱曲率，m^{-1}。

综上，带入数值计算得钻铤结构的外载荷如下：扭矩32.2 kN·m，内、外表面压力均为164.3 MPa，轴向力3 140 kN，二阶屈曲弯矩6.6 kN·m，螺旋屈曲弯矩336.3 kN·m。

3　有限元模型构建

3.1　模型建立与网格划分

基于表1、表2构建钻铤-双内接头螺纹啮合模型（见图3a）。网格划分以四面体网格为主，全局尺寸2.5 mm，接触区局部1.0 mm（见图3b），模型共生成262万个单元。



a. 模型

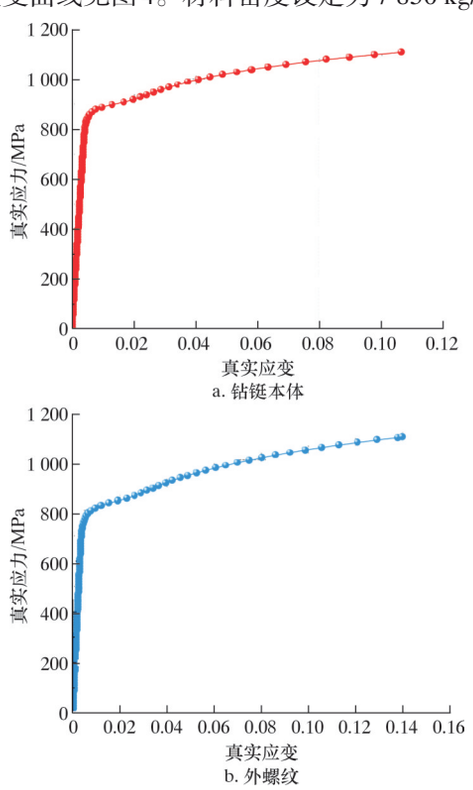
b. 网格

图3　模型建立与网格划分

Fig. 3　Model building and meshing

3.2　材料本构模型

钻铤材料为40CrMnMo钢，弹性模量210 GPa，泊松比0.3，屈服强度868.7 MPa，抗拉强度1 004 MPa；外螺纹材料屈服强度783.3 MPa，抗拉强度955.0 MPa。采用弹塑性本构关系，材料真应力-应变曲线见图4。材料密度设定为7 850 kg/m^3。



a. 钻铤本体

b. 外螺纹

图4　材料真应力-应变曲线

Fig. 4　True stress-strain curve of materials

3.3　边界条件与载荷施加

模型边界条件设置如图5所示。双内接头外侧截面施加固定支撑约束；钻铤上端截面同步施加轴向压缩应力、扭矩及弯矩；钻铤–双内接头内（外）表面分别承受内压和外压载荷。钻铤内外螺纹啮合面及台肩接触面设置摩擦接触（摩擦因数为0.08）。

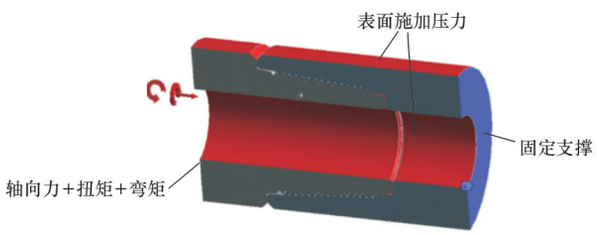


图5　边界条件与载荷施加

Fig. 5　Boundary conditions and load applications

3.4　工况设置

研究中数值模拟共设置15组工况，详见表3。这里分别研究高弯矩作用下的应力分布、上扣过程中应力分布、扭矩与弯矩波动工况下应力分布。

表3　数值模拟工况设置

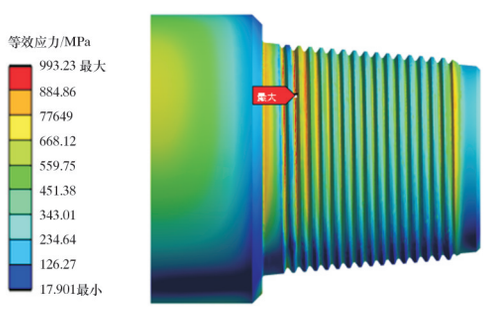
Table 3　Working condition setting for numerical simulation

工况	顶驱扭矩/（kN·m）	钻铤内、外表面压力/MPa	钻铤轴向力/kN	弯矩载荷/（kN·m）
1	32.2	164.31/164.35	3 140	67.3
2	32.2	164.31/164.35	3 140	134.5
3	32.2	164.31/164.35	3 140	229.6
4	32.2	164.31/164.35	3 140	275.8
5	50.0	164.31/164.35	3 140	6.6
6	32.2	164.31/164.35	3 140	±6.6
7	0	164.31/164.35	3 140	6.6
8	11.3	164.31/164.35	3 140	6.6
9	22.5	164.31/164.35	3 140	6.6
10	41.9	164.31/164.35	3 140	6.6
11	58.8	164.31/164.35	3 140	6.6
12	32.2	164.31/164.35	3 140	0
13	32.2	164.31/164.35	3 140	2.3
14	32.2	164.31/164.35	3 140	4.6
15	32.2	164.31/164.35	3 140	8.6

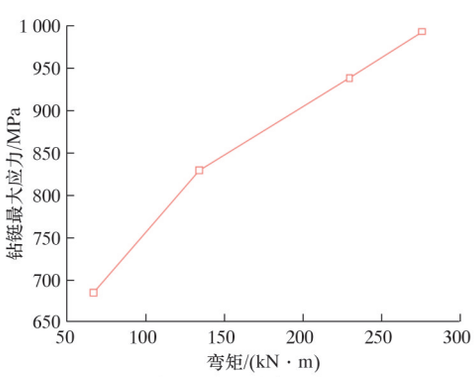
4　有限元结果与分析

4.1　高弯矩作用下钻铤应力分析

第2节弯矩计算结果表明，万米级深井钻具螺旋屈曲时产生的弯矩峰值达336.3 kN·m。基于第3节建立的有限元模型，对工况1~4进行数值模拟，研究高弯矩作用下钻铤应力分布特征，重点分析底端第2外螺纹处最大应力与弯矩的关联规律。图6a显示当弯矩为275.8 kN·m时，外螺纹处最大应力达993.23 MPa（位于底端第2外螺纹根部），超过材料抗拉强度（783.3 MPa）导致断裂失效。图6b定量揭示了弯矩与最大应力的线性正相关规律。当弯矩超过材料承载极限时即发生断裂失效。建议工程现场对钻压实时监测采集，借助前文建立的弯矩载荷计算方法，实现对弯矩载荷的间接监测，避免钻铤瞬时强度失效。



a. 钻铤应力分布



b. 弯矩与钻铤最大应力关系曲线

图6　弯矩作用下钻铤应力云图

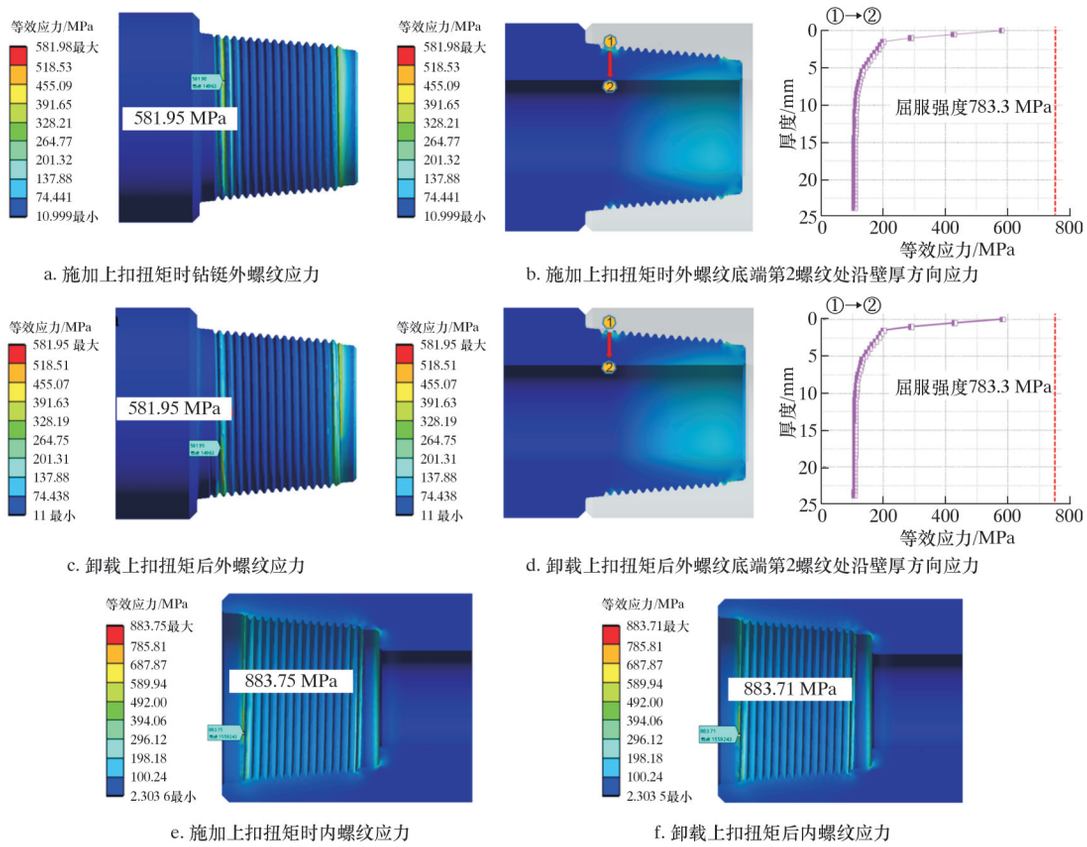
Fig. 6　Stress distribution of drill collar under bending moment

4.2　钻铤工作过程应力分析

4.2.1　钻铤上扣过程应力分析

钻铤预紧作业中，工况5和7分别模拟扭矩加载及卸载过程，应力分布云图如图7所示。施加扭矩时，外螺纹应力集中于顶端第1螺纹和底端第2螺纹处，最大应力值581.98 MPa（位于底端第2螺纹根部），未超出材料屈服强度783.3 MPa（见图7a）。底端第2螺纹应力沿壁厚方向呈指数衰减（见图7b），表面应力峰值区达150~220 MPa。内螺纹第1螺纹表面出现最大应力883.75 MPa（见图7e），超出材料屈服强度868.7 MPa。

扭矩卸载后残余应力分析显示（见图7c~图7d），



a. 施加上扣扭矩时钻铤外螺纹应力　b. 施加上扣扭矩时外螺纹底端第2螺纹处沿壁厚方向应力

c. 卸载上扣扭矩后外螺纹应力　d. 卸载上扣扭矩后外螺纹底端第2螺纹处沿壁厚方向应力

e. 施加上扣扭矩时内螺纹应力　f. 卸载上扣扭矩后内螺纹应力

图 7　钻铤上扣过程应力分布云图

Fig. 7　Stress distribution of drill collar during the make-up process

底端第 2 螺纹表面残余应力峰值达 581. 95 MPa。内螺纹最大残余应力 883. 71 MPa（见图 7f），仍超出材料屈服强度，且应力集中区域与加载状态一致。研究结果表明，底端第 2 螺纹处的高应力集中是钻铤失效的关键诱因。

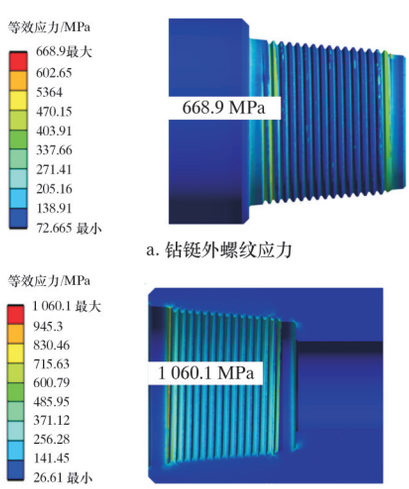
4. 2. 2　钻铤稳定运行工况下应力分析

工况 6 模拟了钻铤在额定工况下应力分布（见图 8）。由图 8 可知：外螺纹应力集中区域位于顶端及底端第 2 螺纹齿根处，最大应力值 668. 9 MPa，与钻铤现场实际失效位置吻合，其壁厚方向平均应力为 130. 9 MPa；内螺纹开口第 1 螺纹处出现最大应力 1 060. 1 MPa，超出材料屈服强度，该处平均应力为 132. 8 MPa。研究结果表明，外螺纹底端第 2 螺纹与内螺纹开口第 1 螺纹的应力集中现象显著，在上扣过程产生的残余应力协同作用下，载荷的轻微波动也将影响钻铤疲劳寿命，此规律与 Chen 和 Knight 等[17-18]的研究结论一致。

4. 3　载荷波动对钻铤应力幅影响分析

4. 3. 1　扭矩载荷波动

工况 6、8 研究了扭矩波动（11. 3~32. 2 kN·m）与恒定弯矩（6. 6 kN·m）耦合作用下的螺纹应力



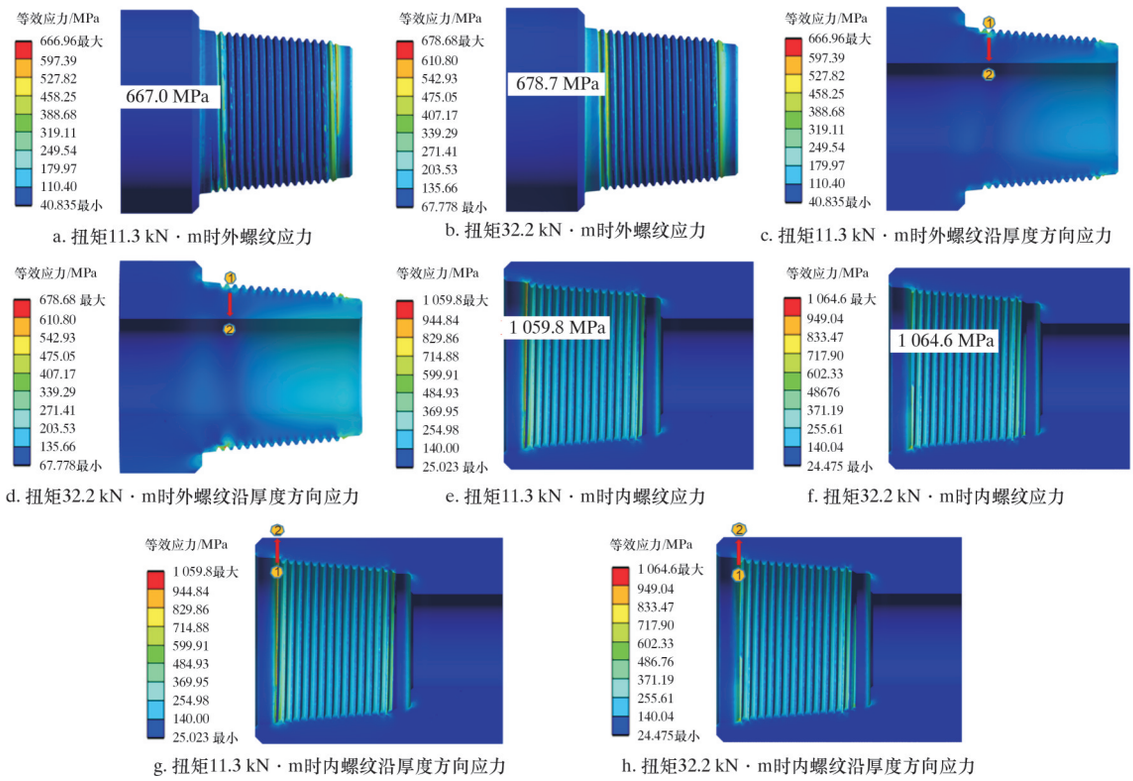
a. 钻铤外螺纹应力

b. 钻铤内螺纹应力

图 8　额定工况下钻铤结构应力分布

Fig. 8　Stress distribution of drill collar under rated working conditions

幅变化（见图 9a~图 9d）。由图 9 可知：应力集中区域始终位于顶端第 1 螺纹和底端第 2 螺纹处；底端第 2 螺纹处最大等效应力由 667. 0 MPa（扭矩 11. 3 kN·m）增至 678. 7 MPa（扭矩 32. 2 kN·m），对应力幅 11. 7 MPa。由图 10a 可得钻铤外螺纹沿壁厚方向的平均应力，其随扭矩增大从 97. 2 MPa 增



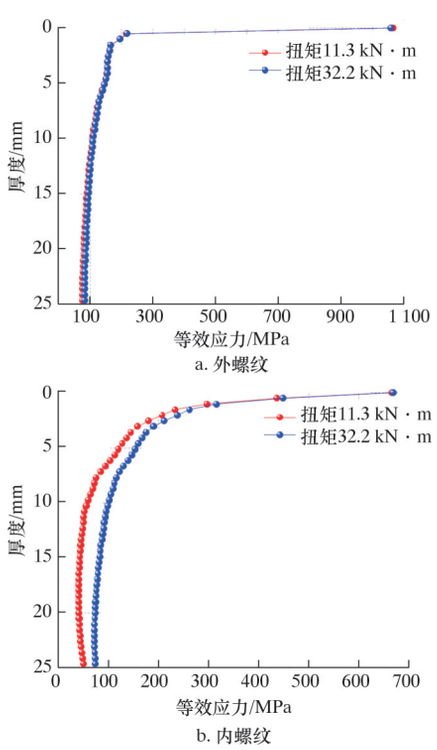
a. 扭矩11.3 kN · m时外螺纹应力　b. 扭矩32.2 kN · m时外螺纹应力　c. 扭矩11.3 kN · m时外螺纹沿厚度方向应力

d. 扭矩32.2 kN · m时外螺纹沿厚度方向应力　e. 扭矩11.3 kN · m时内螺纹应力　f. 扭矩32.2 kN · m时内螺纹应力

g. 扭矩11.3 kN · m时内螺纹沿厚度方向应力　h. 扭矩32.2 kN · m时内螺纹沿厚度方向应力

图 9　扭矩载荷波动下螺纹应力分布云图

Fig. 9　Thread stress distribution under torque fluctuation



a. 外螺纹

b. 内螺纹

图 10　扭矩波动时应力最大值沿厚度方向分布曲线

Fig. 10　Distribution of maximum stress along the thickness direction during torque fluctuation

大至 125.2 MPa，形成 28.0 MPa 应力幅。虽然 11.7 MPa局部应力幅绝对值较小，但在静态应力（678.7 MPa）和残余应力（581.95 MPa）的共同作用下，实际交变应力峰值持续超过材料屈服强度的85%，符合低周疲劳失效特征，在长期的扭矩载荷波动下，仍可引发显著塑性累积应变，最终导致疲劳失效，与Galagedarage等[19]的研究结果一致。

图9e~图9h展示了扭矩波动下钻铤内螺纹应力分布特征。由图9e~图9h可知：应力集中区域始终位于开口第1螺纹处；当扭矩为11.3 kN·m时最大应力达1 059.8 MPa，扭矩32.2 kN·m时增大至1 064.6 MPa，均超出材料屈服强度，形成4.8 MPa应力幅。壁厚方向平均应力随扭矩增大由129.3 MPa增至132.8 MPa，对应3.5 MPa应力幅（见图10b）。该应力幅低于外螺纹区域应力幅，虽会引发疲劳损伤累积，但内螺纹失效风险低于外螺纹，与工程现场钻铤外螺纹易失效现象一致。

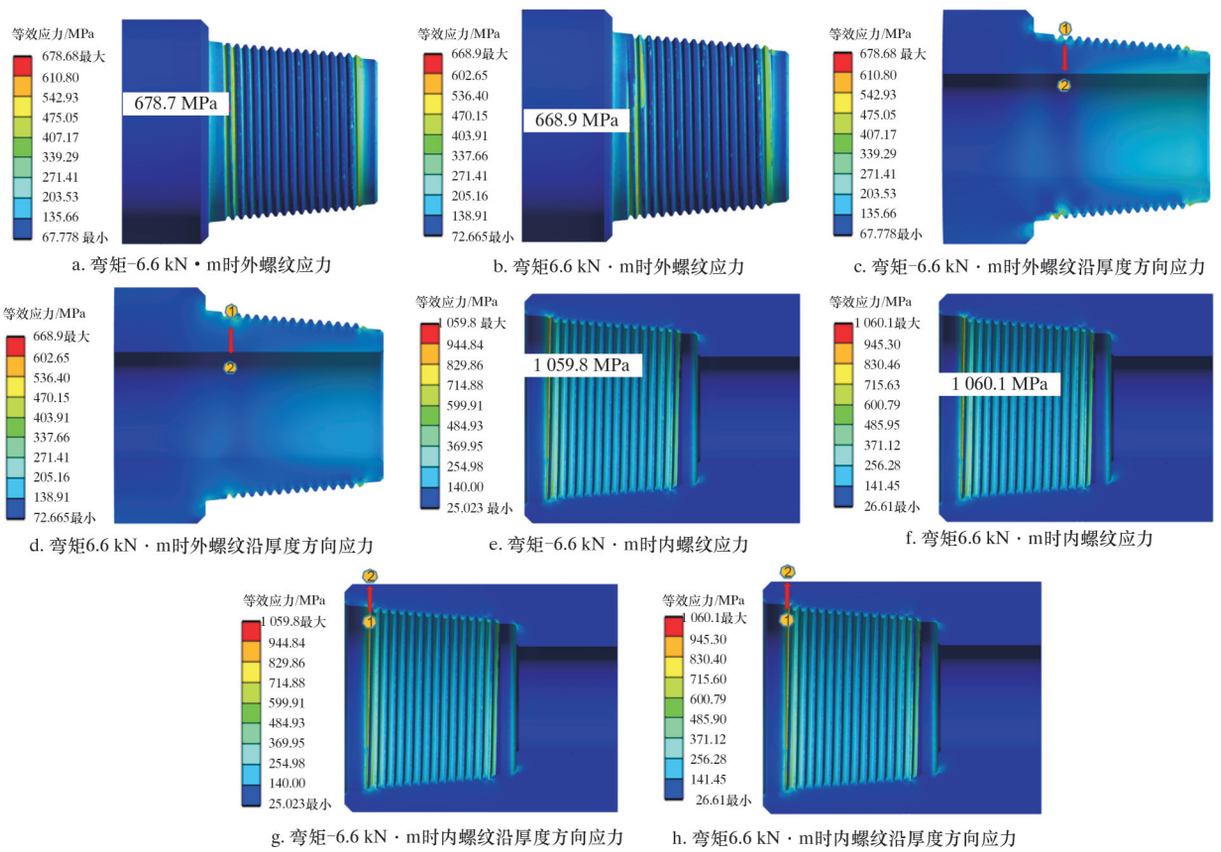
4.3.2　弯矩载荷波动

钻井作业中，钻铤受井斜及钻柱屈曲引发的交变弯矩载荷作用也易产生疲劳源。对工况6（弯矩载荷±6.6 kN·m）进行应力模拟分析，结果如图11a~图11d所示。

由图11a~图11d可知：交变弯矩载荷下外螺纹应力集中于顶端第1螺纹和底端第2螺纹处；弯矩

为−6.6 kN·m时最大应力为678.7 MPa，6.6 kN·m时减小至668.9 MPa，形成9.8 MPa应力幅。由钻铤壁厚方向应力分析（见图12）可得，底端第2螺纹平均应力随弯矩变化由125.2 MPa（弯矩−6.6 kN·m）增大至130.9 MPa（弯矩6.6 kN·m），产生5.7 MPa应力幅，与扭矩载荷波动分析类似，钻铤应力集中区域应力值较大，在静态应力和残余应力的共同作用下，实际交变应力峰值持续超过材料屈服强度的85%，这将导致外螺纹区域发生疲劳累积损伤，但由于应力幅值减小，塑性累积应变较扭矩波动载荷慢。

图11e~图11h展示了交变弯矩载荷下钻铤内螺纹应力分布特征。由图11e~图11h可知：应力集中区域稳定存在于开口第1螺纹处，最大应力值在弯矩−6.6 kN·m时为1 059.8 MPa，弯矩6.6 kN·m时微增至1 060.1 MPa，形成0.3 MPa应力幅。图12b为内螺纹沿壁厚方向应力分布。底端第2螺纹平均应力随弯矩变化由124.5 MPa（弯矩−6.6 kN·m）提升至132.8 MPa（弯矩6.6 kN·m），产生8.3 MPa应力幅。虽然该区域应力较大，但应力幅值可忽略，因此疲劳失效风险远低于外螺纹。



a. 弯矩−6.6 kN·m时外螺纹应力　b. 弯矩6.6 kN·m时外螺纹应力　c. 弯矩−6.6 kN·m时外螺纹沿厚度方向应力

d. 弯矩6.6 kN·m时外螺纹沿厚度方向应力　e. 弯矩−6.6 kN·m时内螺纹应力　f. 弯矩6.6 kN·m时内螺纹应力

g. 弯矩−6.6 kN·m时内螺纹沿厚度方向应力　h. 弯矩6.6 kN·m时内螺纹沿厚度方向应力

图11　弯矩载荷波动下螺纹应力分布云图

Fig. 11　Thread stress distribution under bending moment fluctuation

4.4　钻铤应力水平对载荷变化敏感度分析

4.4.1　钻铤螺纹应力水平对扭矩载荷敏感度

对工况6~11进行应力计算，研究钻铤螺纹应力对扭矩载荷的敏感性（见图13）。图13a显示外螺纹底端第2螺纹齿根处最大等效应力随扭矩增大呈线性增长，敏感度为6 MPa/（10 kN·m）。扭矩载荷波动下，最大应力处将产生更大的疲劳损伤，缩短钻铤使用寿命。分别计算外螺纹沿壁厚方向平均应力，绘制平均应力与扭矩载荷关系曲线（见图13b）。由图13b可知，该区域平均应力对扭矩的敏感度达20 MPa/（10 kN·m）。可依据扭矩载荷敏感度曲线实现最大应力与平均应力的快速预测，为工程现场最大应力安全监测及钻铤寿命预测提供可行方法。

4.4.2　钻铤外螺纹最大应力水平对弯矩载荷敏感度

对工况6、12~15进行应力计算，研究低弯矩载荷下钻铤螺纹应力敏感性（见图14）。图14a显示外螺纹底端第2螺纹齿根处最大等效应力随弯矩增加呈线性上升，敏感度为7.3 MPa/（10 kN·m）。

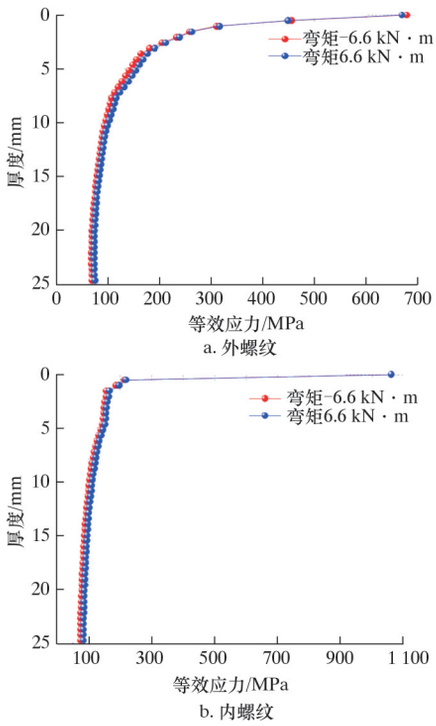


图 12　弯矩波动时应力最大值沿厚度方向分布曲线

Fig. 12　Distribution of maximum stress along the thickness direction during bending moment fluctuation

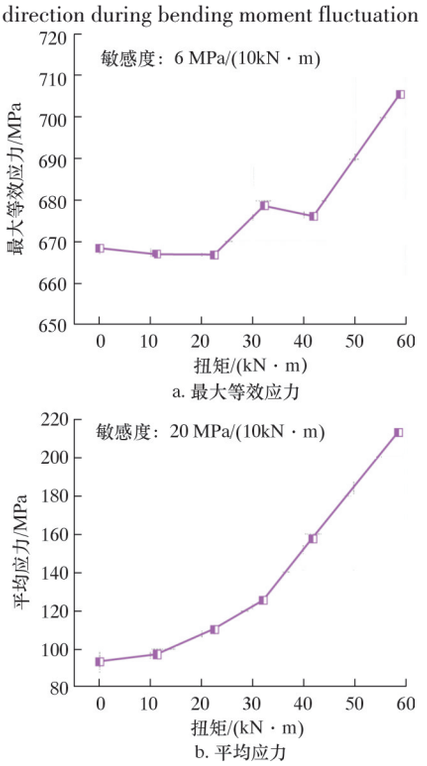


图 13　钻铤螺纹应力对扭矩载荷的敏感性曲线

Fig. 13　Sensitivity of drill collar thread stress to torque

分别计算沿壁厚方向的平均应力，绘制平均应力与弯矩载荷关系曲线（见图 14b）。由图 14b 可知，该区域平均应力对弯矩载荷的敏感度为 5. 2 MPa/(10 kN·m)。可依据弯矩载荷敏感度曲线实现最大应力与平均应力的快速预测。

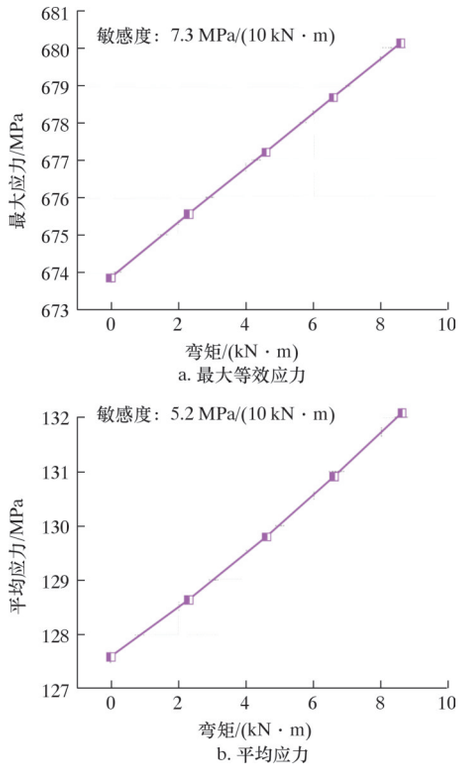


图 14　钻铤螺纹应力对弯矩载荷的敏感性曲线

Fig. 14　Sensitivity of drill collar thread stress to bending moment

5　结　论

（1）给出了万米深井钻铤危险位置外载荷计算方法。经计算，钻铤内、外表面压力均为 164. 3 MPa，轴向压缩力为 3 140 kN，二阶屈曲弯矩为 6. 6 kN·m，螺旋屈曲弯矩为 336. 3 kN·m。

（2）大的弯矩载荷将导致钻铤强度失效。螺旋屈曲产生的弯矩（336. 3 kN·m）使外螺纹根部应力达 993. 23 MPa，接近材料抗拉强度，存在瞬时失效风险。

（3）扭矩波动（11. 3~32. 2 kN·m）与交变弯矩（±6. 6 kN·m）分别产生 11. 7 与 9. 8 MPa 局部应力幅，在上扣残余应力的叠加影响下，将引起塑性累积应变，加速疲劳失效。

（4）外螺纹根部平均应力对扭矩、弯矩变化的敏感度分别为 20 MPa/（10 kN·m）、5. 2 MPa/(10 kN·m)，表明在小弯矩作用下，扭矩波动对疲劳损伤的影响更为显著，同时载荷敏感度曲线可实现工程现场钻铤最大应力的快速预测。

参　考　文　献

[1]　Al Shekaili A，Liu Yang，Papatheou E. Drilling performance analysis of a polycrystalline diamond compact

bit via finite element and experimental investigations [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 182: 105862.

[2] Tang Liping, Guo Baolin, Zhu Xiaohua, et al. Stick-slip vibrations in oil well drillstring: a review [J]. Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control, 2020, 39: 885-907.

[3] 龙尧，王安义，伍嘉亨，等. 基于ANSYS软件的钻柱横向振动分析 [J]. 西部探矿工程，2010，22 (8)：42-44.
Long Yao, Wang Anyi, Wu Jiaheng, et al. Lateral vibration analyses of drilling string with ANSYS software [J]. West-China Exploration Engineering, 2010, 22 (8): 42-44.

[4] Ni Hongjian, Huang Bin, Li Wei, et al. Numerical investigation and field verification of the torque and bending moment of drill string for different lateral motion states in the vertical well [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 230: 112637.

[5] 张玉霖，郭闯，尚捷，等. 随钻仪器钻铤的断裂失效分析 [J]. 钢铁研究学报，2022，34 (9)：37-44.
Zhang Yulin, Guo Chuang, Shang Jie, et al. Fracture failure analysis of logging while drilling instrument drill collar [J]. China Metallurgy, 2022, 34 (9): 37-44.

[6] 曲豪，陈锋，陈家磊，等. 特深井井下等效冲击扭矩作用下钻铤接头三维力学特征分析 [J]. 石油钻探技术，2024，52 (2)：211-217.
Qu Hao, Chen Feng, Chen Jialei, et al. Three-dimensional mechanical characteristics of drill collar joints under downhole equivalent impact torque in extra-deep well [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52 (2): 211-217.

[7] Li Yanying, Yu Yongping, Zhao Daisen, et al. Investigation on fatigue life of push-the-bit rotary steerable bottom hole assembly with random bit-rock interaction [J]. Thin-Walled Structures, 2024, 198: 111752.

[8] 余世杰，欧阳志英，龚丹梅，等. 某油田钻铤断裂失效原因分析 [J]. 理化检验-物理分册，2019，55 (3)：200-203.
Yu Shijie, Ouyang Zhiying, Gong Danmei, et al. Cause analysis on fracture failure of drill collar in an oilfield [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part a: Physical Testing, 2019, 55 (3): 200-203.

[9] Shen Yuelin, Chen Wei, Zhang Zhengxin, et al. Drilling dynamics model to mitigate high frequency torsional oscillation [C]//The IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition, Galveston, Texas, USA, 2020: SPE-199634-MS.

[10] Chu F L E, Lund E D, Podbesek J A. Quantitative significance of n-3 essential fatty acid contribution by heterotrophic protists in marine pelagic food webs [J]. Maring Ecology Progress Series, 2008, 354: 85-95.

[11] Zhandayev O, Ungaliyev G, Schlumberger B J. How to avoid bottom hole assembly twist off challenges in under reaming while drilling operations using 4D finite element analysis modelling [C]//The SPE Oklahoma City Oil and Gas Symposium, Oklahoma, USA, 2019: SPE-195213-MS.

[12] Zhu Xiaohua, Li Ke, Li Wenzhe, et al. Drill string mechanical behaviors of large-size borehole in the upper section of a 10 000 m deep well [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44 (1): 49-57.

[13] Qu Hao, Chen Feng, Chen Jialei, et al. Three-dimensional mechanical characteristics of drill collar joints under downhole equivalent impact torque in extra-deep well [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52 (2): 211-217.

[14] Ambrus A, Cayeux E, Shor R J. Investigation of field scenarios using a 4n degrees of freedom transient torque and drag model [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 233: 212563.

[15] Huang Bin, Ni Hongjian, Zhang Heng, et al. Experimental and numerical investigation on the relationship between stick-slip vibration and rate of penetration [J]. Nonlinear Dynamics, 2025, 113 (6): 5041-5065.

[16] Chen Jingkai, Yang Lei, Huang Qi, et al. Dynamic analysis of drill string vibration enhanced by neural network based models [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2025, 246: 213618.

[17] Chen S S. Fluid damping for circular cylindrical structures [J]. Nuclear Engineering and Design, 1981, 63 (1): 81-100.

[18] Knight M J, Brennan F P. Fatigue life improvement of drill collars through control of bore eccentricity [J]. Engineering Failure Analysis, 1999, 6 (5): 301-319.

[19] Galagedarage Don M, Rideout G. Fatigue life prognosis of an oil well drill string using cascaded dynamic models [J]. Applications in Engineering Science, 2023, 15: 100142.

第一作者简介：邝献任，高级工程师，生于1978年，2002年毕业于西安石油大学焊接工艺及设备专业，现从事石油管材及装备材料研发和失效研究工作。地址：(710077) 陕西省西安市。电话：(029) 81887896。email：kuangxr@cnpc.com.cn。

修改回稿日期：2026-03-16

（本文编辑　王刚庆）