

中空螺杆取心钻具中空万向节力学分析

韩泽龙^{1,2}, 赵明^{1,2}, 张欣^{1,2}, 田英英^{1,2}, 王林浩^{1,2*}, 陈晓君^{1,2,3}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 中国地质调查局深部探测钻探装备技术创新中心, 河北廊坊 065000; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 中空万向节是中空螺杆取心钻具中的薄弱环节之一, 它直接影响着中空螺杆取心钻具的使用寿命。在传统实心挠性轴万向节的基础上进行中空化设计, 并利用有限元软件对中空万向节进行了力学分析, 研究了力学参数, 几何参数对其力学性能的影响。结果显示, 与常规挠性轴万向节相比, 具有通浆孔的中空万向节在通浆孔处应力、应变较大, 易发生损伤失效, 其他部位的受力情况与同尺寸不具备通浆孔的中空万向节基本一致, 通浆孔并未改变其他部位受力情况; 应力和扭矩呈比例关系; 应变随着扭矩的增大而增大, 但增加的幅度随着扭矩的增大而降低, 呈非线性规律变化; 当通浆孔距离端面 250 mm 时, 应力、应变均为最小, 该尺寸为最优尺寸。研究结果为后续高性能中空万向节的设计奠定了基础。

关键词: 中空螺杆; 取心钻具; 中空万向节; 力学分析; 优化设计

中图分类号: P634.4; TE921⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)04-0075-06

Mechanical analysis of hollow universal joint in hollow screw core drilling tool

HAN Zelong^{1,2}, ZHAO Ming^{1,2}, ZHANG Xin^{1,2}, TIAN Yinyin^{1,2}, WANG Linhao^{1,2*}, CHEN Xiaojun^{1,2,3}

(1. *Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China*; 2. *Technology Innovation Center for Deep Exploration Drilling Equipment, China Geological Survey, Langfang Hebei 065000, China*; 3. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: The hollow universal joint is one of the vulnerable components in hollow screw coring drill tools, directly affecting their service life. Based on the traditional solid flexible shaft universal joint, a hollow design was implemented. Finite element software was employed to conduct mechanical analysis of the hollow universal joint, investigating the influences of mechanical and geometric parameters on its mechanical performance. Results showed that compared to conventional flexible shaft universal joints, the hollow universal joint with grouting holes exhibited higher stress and strain at the grouting hole locations, making them prone to damage and failure. The stress distribution in other regions remained consistent with hollow universal joints of the same dimensions without grouting holes, indicating that grouting holes did not alter stress conditions in non-hole areas. Stress demonstrated a proportional relationship with torque, while strain increased with torque but exhibited a diminishing growth rate as torque rose, following a nonlinear pattern. When the grouting hole was positioned 250 mm from the end face, both stress and strain reached minimum values, identifying this configuration as the optimal design. These findings establish a foundation for subsequent development of high-performance hollow universal joints.

Key words: hollow screw; core drilling tools; hollow universal joint; mechanical analysis; optimal design

0 引言

一直以来, 钻穿地壳至地幔, 探索地球组成, 揭

示地球板块构造、生命起源、资源能源分布、环境变化等影响因素、发展规律和趋势是地质学者追求的

收稿日期: 2024-10-11; 修回日期: 2025-02-17 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.04.010

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“深海钻探工程关键技术支撑”(编号: DD20221721)

第一作者: 韩泽龙, 男, 汉族, 1993 年生, 工程师, 硕士, 主要从事深地、深海钻探取心技术研究工作, 河北省廊坊市广阳区金光道 77 号, 785674682@qq.com。

通信作者: 王林浩, 男, 汉族, 1999 年生, 助理工程师, 硕士, 主要从事海工器具、装备研究工作, 河北省廊坊市广阳区金光道 77 号, 1158128023@qq.com。

引用格式: 韩泽龙, 赵明, 张欣, 等. 中空螺杆取心钻具中空万向节力学分析[J]. 钻探工程, 2025, 52(4): 75-80.

HAN Zelong, ZHAO Ming, ZHANG Xin, et al. Mechanical analysis of hollow universal joint in hollow screw core drilling tool[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(4): 75-80.

目标。但陆地地壳平均厚度较大,钻穿难度极大,科学家便将目光转向海洋,海底地壳更薄,更有可能钻穿,因此,大洋钻探成为探索地球奥秘的重要途径^[1-5]。随着钻进深度增加,岩石硬度也在增加,但硬岩取心技术一直没有较大的突破。目前海底硬岩仍以回转取心(RCB)为主,没有好的硬岩取心钻具制约了大洋钻探向地球深部进军脚步^[6-9]。

与RCB取心技术相比,井下动力取心技术的优点是破岩过程中钻头的回转动力是依靠泥浆驱动,钻杆无需回转,这种钻进方式对钻孔的稳定性更加友好,井壁安全和钻具安全性能大大提高,同时可以大幅提高钻进效率和岩心采取率^[10-11]。2023年起,勘探技术研究所针对海底硬岩地层研制了中空螺杆式井下动力取心钻具,通过“中空螺杆+绳索取心”的方式实现井下动力和快速打捞,全尺寸螺杆可以提供更大扭矩的同时,具有钻具扰动低、钻进效率高和取心率高的优点。

1 中空螺杆取心钻具中空万向节设计

中空螺杆井下动力取心钻具如图1所示,由中空螺杆总成和绳索取心总成组成^[12]。其中绳索取心总成与常规绳索取心钻具内总成结构基本相同,仅将常规取心钻具内总成悬挂环更换为密封座。中空螺杆总成包括中空转子马达总成、中空万向节、传动轴总成、取心钻头四部分。中空螺杆总成与常规螺杆的主要区别是转子和万向节部分。

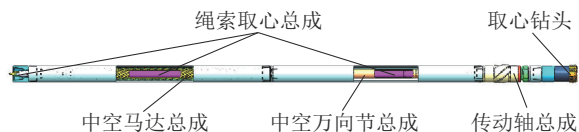


图1 中空螺杆井下动力取心钻具

Fig.1 Hollow screw coring drilling tool

中空螺杆的转子外轮廓线与常规转子轮廓线基本一致,设计过程中采用多头数和大等距半径的螺旋线设计准则,在保证输出功率的基础上实现了小偏移量目标,最大限度地提高了径向中空尺寸,可在内部中空空间安装绳索取心总成;采用短节距的设计,在取心钻具长度一定时增加螺杆级数,增大转子转速,实现高效钻进和岩心高效采集^[13-14]。

万向节是将马达转子的平面行星运动转化为传动轴的定轴转动,并把马达的工作转矩传递给传

动轴的关键部件,解决马达偏心和挠性问题,在工作时空万向节在传递扭矩的同时承受回转交变产生的侧向摆动力^[15]。现在常用的万向节为花瓣式万向轴,球铰式万向轴,但其均为实心结构,无法安装取心钻具。中空螺杆的中空万向节如图2所示,采用中空挠性轴结构,挠性轴与上部转子和下部传动轴直接连接,中空万向节上设计有通浆孔,通浆孔位于中空万向节与传动轴连接端,该处为母螺纹,母螺纹端面距离变径倒角处尺寸为180 mm,通浆孔圆心距离母螺纹端面最小距离为200 mm。通浆孔尺寸设计以过流面积为依据。中空万向节内径 $\varnothing 85$ mm,取心总成外径 $\varnothing 73$ mm,内部环空过流面积为1488.5 mm²,选择开4个周向均布的长圆孔作为通浆孔,过流面积7962.5 mm²,远大于内部环空过流面积,满足使用需求,泥浆可通过通浆孔进入传动轴总成内部。本文重点研究中空万向节受力情况,优化中空万向节设计。

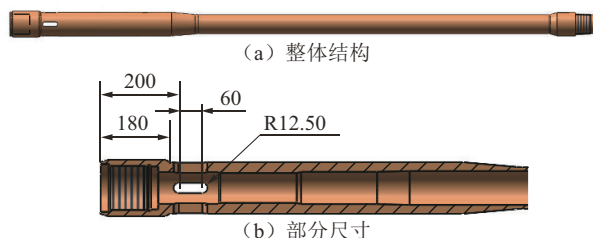


图2 中空万向节

Fig.2 Hollow Universal Joint

2 中空万向节受力学模型

中空万向节在工作条件下的力学模型可简化为纵横弯曲梁柱,受力模型见图3,所载荷为转子两端的压力差使中空万向节所承受的最大轴向力 P 、中空万向节自身的离心惯性力 $q(x)$ 及中空万向节两端的支撑对中空万向节的弯矩 M_A 和 M_B ^[16-19]。

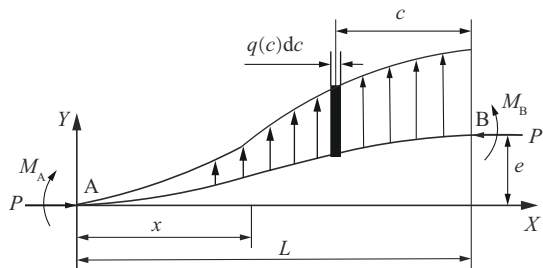


图3 中空万向节受力模型

Fig.3 Stress model of hollow universal joint

弯矩 M_A 和 M_B 分别为:

$$M_A = \frac{Z(u)(\theta_q^R - e/L) - 2Y(u)(\theta_q^L + e/L)}{Z^2(u) - 4Y^2(u)} \cdot \frac{6EI}{L} \quad (1)$$

$$M_B = \frac{2Y(u)(\theta_q^R - e/L) - Z(u)(\theta_q^L + e/L)}{4Y^2(u) - Z^2(u)} \cdot \frac{6EI}{L} \quad (2)$$

其中:

$$Z(u) = 3(1/\sin 2u - 1/2u)/u \quad (3)$$

$$Y(u) = 3(1/2u - 1/\tan 2u)/2u \quad (4)$$

$$\theta_q^L = \int_0^L \frac{q(x) \sin k(L-x)}{P \sin kL} dx - \int_0^L \frac{q(x)(L-x)}{PL} dx \quad (5)$$

$$\theta_q^R = \int_0^L \frac{q(x) \sin kx}{P \sin kL} dx - \int_0^L \frac{q(x)x}{PL} dx \quad (6)$$

式中: $Z(u)$ 、 $Y(u)$ ——均为挠性轴的放大因子; u ——挠性轴的稳定系数, $u = L\sqrt{P/EI}/2 = kL/2$; L ——中空万向节长度; E ——材料的弹性模量; I ——挠性轴的截面惯性矩; k ——挠性轴稳定系数参数; θ_q^R 、 θ_q^L ——分别为离心惯性力产生的 $q(x)$ 在挠性轴两端产生的转角; e ——螺杆转子装配偏心距。

作用在螺杆端面上的液体压力降造成的轴向力 P 由式(7)计算。

$$P = \pi \Delta p (D_L - h)^2 / 4 \quad (7)$$

式中: Δp ——螺杆压力降; D_L ——螺杆外径; h ——螺杆转子齿高; $D_L - h$ 为转子啮合齿的平均直径, 所限制的面积近似等于啮合线所限制的面积。

如果轴向力接近于稳定的临界值, 横向的惯性力将引起很大的破坏作用, 但一般情况轴向力远小于临界值, 横向的惯性力在计算中可以忽略。

转子带动挠性轴传递扭矩, 扭矩的大小与转子有关。还需校核轴是否能够承受该扭矩。计算扭矩引起的剪应力的公式为:

$$\tau = 16MD / [\pi(D^4 - d^4)] \quad (8)$$

式中: M ——工作过程中万向节所受扭矩; D ——万向节外径; d ——万向节内径。

结合纵横弯曲梁柱理论以及边界条件 $y(0) = 0$, $y'(0) = 0$, $y(L) = e$ 及 $y'(L) = 0$ 可算出挠性轴变形量, 依据变形量可分析受力状态。

$$y(x) = \frac{M_A \sin k(L-x)}{P \sin kL} + \frac{M_B \sin kL}{P \sin kL} - \frac{M_A(L-x)}{PL} - \frac{M_B x}{PL} - \frac{x}{PL} \int_0^{L-x} q(c) dc + \frac{\sin kL}{Pk \sin kL} \int_0^{L-x} q(c) \sin kL dc + \frac{\sin k(L-x)}{Pk \sin kL} \int_{L-x}^L q(c) \sin k(L-x) dc - \frac{L-x}{PL} \int_{L-x}^L q(c)(L-c) dc + \frac{ex}{L} \quad (9)$$

3 有限元模型建立

中空万向节结构模型导入至有限元分析软件。为减少仿真分析的计算量和时间, 对中空万向节的几何模型进行简化, 将部分倒角等微小单元进行省略, 建立有限元分析计算模型, 然后进行强度校核。材料选为 42CrMo, 对通浆孔处网格进行加密处理, 在不规则处选用四面体 C3D10 网格, 在规则处选用六面体 C3D8R 网格, 网格扫掠生成, 如图 4 所示, 整体网格数目为 40691 个^[20]。

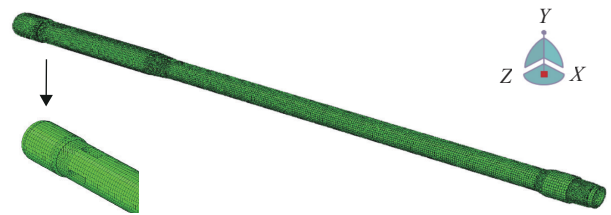


图4 中空万向节网格划分

Fig.4 Hollow universal joint mesh division

分析过程中采用相同偏心距(6 mm), 分别对通浆孔距母螺纹端面不同距离(0、200、250、300、350 mm, 其中 0 表示无通浆孔)的中空万向节施加不同的扭矩(5、6、7、8、9 kN·m), 计算相应应力及应变。

分析过程中采用 Static, General 分析模式, 计算时将中空万向节与传动轴连接端的母螺纹面固定, 将中空万向节与转子连接端的公螺纹施加耦合约束, 将面耦合绑定至一点, 在该点处施加扭矩及偏心距, 分析中空万向节受力情况。

4 理论计算分析

4.1 中空万向节应力情况分析

工作过程中中空万向节受力状态如图 5 所示, 以通浆孔距母螺纹端面距离为 250 mm、施加 9 kN·

m的挠性万向节为例进行说明。当未加工通浆孔时,最大应力处于中空万向节与转子连接接头过渡区,为127 MPa。当加工通浆孔后,最大应力处于通浆孔处,当转子端向上偏移时,通浆孔下部(与转子运动相反方向)为应力最大处,为168 MPa,中空万向节与转子连接接头过渡区的应力为128 MPa,与未加工通浆孔的应力基本一致,说明加工通浆孔并未影响其他部件应力状态。42CrMo材料失效应力为935 MPa,在9 kN·m扭矩下安全系数为5.5,远大于常规安全系数2.2,说明万向节工作状态良好。

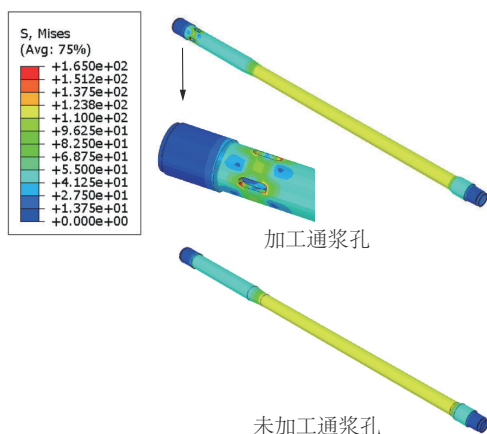


图5 中空万向节受力状态

Fig.5 Stress state of hollow universal joint

不同工作条件下中空万向节应力情况如图6所示,分别为中空万向节偏心距为6 mm时不同扭矩和通浆孔距离条件下应力情况,以通浆孔距母螺纹端面距离为250 mm为例,结果显示扭矩在5~9 kN·m时,扭矩与应力呈线性关系,比例系数约18.75 MPa/(kN·m)。应力随扭矩每增加1 kN·m时,绝对增量稳定在18.75 MPa左右,但因计算基数增大,百分比增幅从20%逐级递减至12%。此规律符合线弹性理论,表明材料处于弹性变形阶段,应力-扭矩线性正相关。

在相同扭矩下,不同通浆孔距离对应力也产生较大影响。在7 kN·m扭矩作用下,通浆孔距离对应力分布影响显著:200 mm距离对应181 MPa应力,250 mm时降至最低值131 MPa,300 mm回升至181 MPa,350 mm则增至196 MPa。最大应力随着距离的增加呈现先增加后减小再增加的趋势,且所有扭矩条件下均符合这个趋势。结果表明250 mm为最优距离,可使结构应力最小化。

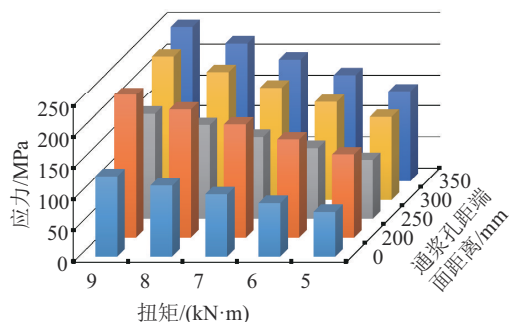


图6 不同工作条件下中空万向节应力情况

Fig.6 Stress situation of hollow universal joint under different working conditions

4.2 中空万向节应变情况分析

中空万向节应变情况如图7所示,以通浆孔距母螺纹端面距离为250 mm、施加9 kN·m的万向节为例进行说明。当未加工通浆孔时,最大应变处于中空万向节与转子连接接头过渡区,为0.000484。当加工通浆孔后,最大应变处于通浆孔处,当绕杆端施加顺时针扭矩时,通浆孔应变变化区域呈螺旋状,靠近转子端通浆槽下部为应变最大处,为0.000794,中空万向节与转子连接接头过渡区的应变为0.000482,与未加工通浆孔应力基本一致,说明开通浆孔并未影响其他部件受力情况。

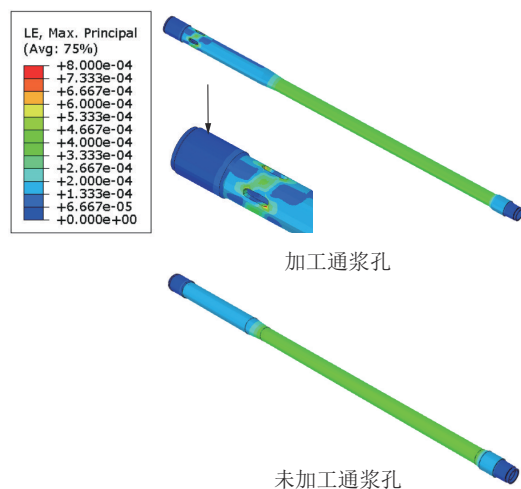


图7 中空万向节应变情况

Fig.7 Strain situation of hollow universal joint

不同工作条件下中空万向节应变情况如图8所示,在偏心距为6 mm时,中空万向节应变随扭矩和通浆孔距离变化显著。当通浆孔距离固定为250 mm时,扭矩从5 kN·m增至9 kN·m,应变由

0.000465 升至 0.000827, 增幅从 19% 递减至 12.4%, 说明应变随扭矩非线性增长且增速减缓。相同扭矩 (7 kN·m) 下, 通浆孔距离对应变影响明显: 200、250、300、350 mm 分别对应 0.000887、0.000646 (最小值)、0.000899 和 0.000964, 250 mm 距离下应变最小, 与应力分析结果规律一致, 该距离为综合性能最佳参数。

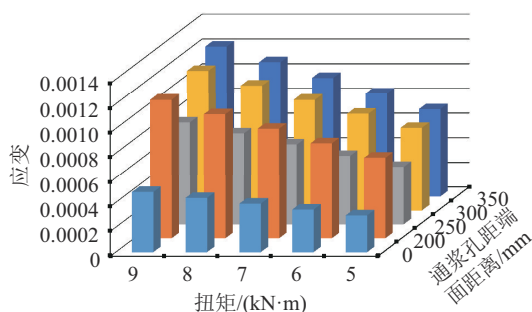


图8 不同工作条件下中空万向节应变情况

Fig.8 Strain situation of hollow universal joint under different working conditions

5 中空螺杆性能测试

为测试中空万向节在螺杆马达传递内部载荷中的使用效果, 进行螺杆马达室内台架机械性能测试。测试中将螺杆马达输入端连接进水口, 中空转子顶部堵塞, 输入端安装有流量传感器, 试验采用清水介质, 逐步增大流量。螺杆马达输出端连接测功机, 在流量恒定前提下由测功机向螺杆马达施加反扭矩, 可通过测功机上的编码器和扭矩传感器得出螺杆马达的瞬时转速和扭矩。

针对不同排量下螺杆马达对应的扭矩与转速进行了测试。从图9中看出, 螺杆马达输出转速随着排量增加而增大, 与排量基本符合线性关系。随着扭矩的增大, 螺杆马达的转速曲线较为平滑, 但扭矩增大导致压降增大, 压力压迫定子胶皮, 导致定、转子间隙增大, 转速略微下降, 但未出现大幅下降, 说明其具有较好的转速硬特性, 满足使用需求。

在野外试验场进行硬岩取心作业, 在 30 L/s 排量下累计测试 80 h, 试验完成后对螺杆进行拆卸, 检查中空万向节情况, 如图 10 所示, 中空万向节未发生断裂, 表面未出现裂纹, 但中空万向节内外壁由于海水基泥浆冲刷造成一定的磨损和锈蚀。中空万向节与转子连接处接头过渡区状态良好, 通浆孔

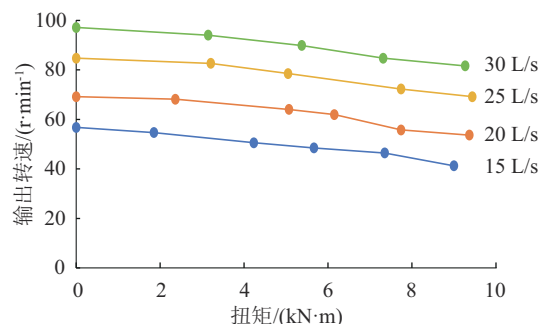


图9 中空螺杆马达扭矩-转速-排量关系

Fig.9 Torque-speed-displacement relationship of hollow screw motor

处存在部分冲蚀, 初步表明了中空万向节可满足高转速交变应力条件下的扭矩载荷传递。



图10 作业80h后中空万向节情况

Fig.10 Hollow universal joint status post 80h operation

6 结论

(1) 扭矩对应力的影响大于通浆孔与端面距离的影响, 应变受两者影响均较为显著。当通浆孔距离端面 250 mm 时, 为该规格中空万向节最优设计状态。在施加 9 kN·m 扭矩工况下, 其安全系数达 5.5, 显著高于合理安全系数 2.2, 应力分布符合设计要求, 验证了结构设计的合理性与可靠性。

(2) 基于室内台架试验, 揭示了螺杆马达扭矩-转速特性与泥浆排量的关系, 并通过野外试验场全尺寸实际作业, 验证了中空万向节在作业过程中高转速交变载荷下稳定的扭矩传递能力以及良好的寿命, 为螺杆马达针对不同地层优化钻进工艺参数提供了理论依据。

(3) 有限元软件分析过程中发现加工通浆孔仅影响其附近的应力状态, 对中空万向节其他部位影响的程度较小, 后续研究过程中可聚焦通浆孔附近区域, 对通浆孔自身结构参数 (数量、长度、宽度) 以及细分通浆孔与端面距离进行分析, 优化结构, 提

高中空万向节的可靠性。

参考文献(References):

- [1] 王健,李春峰.莫霍钻:未来十年大洋钻探的终极目标与挑战[J].科学,2012,64(1):8-12.
WANG Jian, LI Chunfeng. Mohole drilling project: the ultimate goal and challenge of the international ocean discovery[J]. Science, 2012, 64(1):8-12.
- [2] 汪品先.大洋钻探五十年:回顾与前瞻[J].科学通报,2018,63(36):3866-3876.
WANG Pinxian. Fifty years of scientific ocean drilling: Review and prospect[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(36):3866-3876.
- [3] 冉峰,张涛.近十年大洋科学钻探进展与未来重点发展方向[J].中国地质,2024,51(3):1091-1094.
RAN Hao, ZHANG Tao. Progress of scientific ocean drilling over last decade and future priorities[J]. Geology in China, 2024, 51(3):1091-1094.
- [4] 姜涛,陈慧,孙启良,等.南海深水沉积过程之大洋钻探目标[J].海洋地质与第四纪地质,2022,42(5):33-41.
JIANG Tao, CHEN Hui, SUN Qiliang, et al. Deep water sedimentary processes in South China Sea and proposed scientific drill targets[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(5):33-41.
- [5] 郝丁.发展中的深海钻探、大陆钻探技术[J].海洋世界,2007(11):40-45.
HAO Ding. Developing deep-sea drilling and continental drilling technologies[J]. Ocean World, 2007(11):40-45.
- [6] 叶建良,张伟,谢文卫.我国实施大洋钻探工程的初步设想[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(2):1-8.
YE Jianliang, ZHANG Wei, XIE Wenwei. Preliminary thoughts on implementation of the ocean drilling project in China[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(2):1-8.
- [7] 刘协鲁,陈云龙,阮海龙,等.海底硬岩钻探的现状与前景分析[J].钻探工程,2022,49(1):72-78.
LIU Xielu, CHEN Yunlong, RUAN Hailong, et al. Status and prospect of subsea hard rock drilling[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1):72-78.
- [8] 闫家,梁健,王文,等.深井高速涡轮钻配套同径取心技术研究[J].钻探工程,2024,51(4):23-30.
YAN Jia, LIANG Jian, WANG Wen, et al. Research on the same diameter coring drilling technology used by high-speed turbo-drill for deep well[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4):23-30.
- [9] 王诗竣,宋刚,王瑜,等.中国主导的IODP航次取心所遇问题分析及探讨[J].钻探工程,2023,50(1):10-17.
WANG Shijun, SONG Gang, WANG Yu, et al. Analysis and discussion of the coring problem for China-led IODP voyages[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1):10-17.
- [10] 易先忠.井下动力钻具近十年的研究与发展[J].钻采工艺,1994(1):83-89.
YI Xianzhong. Research and development of underground power drilling tools in the past decade[J]. Drilling & Production Technology, 1994(1):83-89.
- [11] 王仁刚.科钻一井井下动力取心钻具组合有限元分析与井斜控制研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2006.
WANG Rengang. Bottom-hole dynamic coring assembly analysis using the finite element method and deviation control research of Chinese continental scientific drilling No.1 well[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2006.
- [12] 陈晓君,宋刚,王诗竣,等.中空螺杆马达井底动力绳索取心钻具的研制与试验[J].钻探工程,2024,51(5):36-44.
CHEN Xiaojun, SONG Gang, WANG Shijun, et al. Development and test of hollow screw motor Bottom hole power wire-line core drill[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5):36-44.
- [13] 姚洋,Балденко Ф.Д..基于齿条啮合的螺杆钻具定转子造型设计理论[J].石油机械,2020,48(1):26-32.
YAO Yang, Балденко Ф.Д.. Design theory of stator and rotor of PDM based on rack gearing principle[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(1):26-32.
- [14] 黄超,徐建宁,王宁新.螺杆钻具马达线型的优化设计分析[J].电子测试,2017(15):34-35.
HUANG Chao, XU Jianning, WANG Ningxin. The optimized design analysis of screw drill is linear[J]. Electronic Test, 2017(15):34-35.
- [15] 练章华,乐彬,祝效华,等.螺杆钻具挠性轴结构改进分析[J].石油机械,2008,36(1):1-3,15.
LIAN Zhanghua, YUE Bin, ZHU Xiaohua, et al. Analysis of structural improvement of flexible shaft of screw drill[J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(1):1-3,15.
- [16] 梁政,袁祥忠.挠性轴的动态分析[J].石油学报,1994(4):105-111.
LIANG Zheng, YUAN Xiangzhong. Dynamic analysis of a flexible axle[J]. Acta Petrolei Sinica, 1994(4):105-111.
- [17] 季细星,苏义脑,黄衍福.螺杆钻具挠性轴强度校核及干涉量计算[J].石油机械,1997,25(1):5-7,58.
JI Xixing, SU Yinao, HUANG Yanfu. Strength check and interference calculation of flexible shaft on screw drill[J]. China Petroleum Machinery, 1997, 25(1):5-7,58.
- [18] 谢竹庄,程粉荣.挠性轴的应力计算[J].石油钻采机械通讯,1978(5):40-54.
XIE Zhuzhuang, CHENG Fenrong. Stress calculation of flexible shaft[J]. Oil Field Equipment, 1978(5):40-54.
- [19] 梁政,袁祥忠.关于挠性轴计算问题的讨论[J].石油学报,1986,9(3):83-95.
LIANG Zheng, YUAN Xiangzhong. On the calculation of flexible axle[J]. Acta Petrolei Sinica, 1986, 9(3):83-95.
- [20] 王鹰宇.Abaqus分析用户手册[M].北京:机械工业出版社,2017.
WANG Yingyu. Abaqus Analysis User's Guide[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.

(编辑 王跃伟)