

中空螺杆马达井底动力绳索取心钻具的研制与试验

陈晓君^{1,2,3}, 宋刚^{1,3*}, 王诗竣², 韩泽龙^{1,3}, 赵明^{1,3}, 张欣^{1,3}, 田英英^{1,3}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

3. 自然资源部定向钻井工程技术创新中心, 河北廊坊 065000)

摘要:针对大洋钻探硬岩取心钻具钻进效率低、取心效率低等问题, 本文介绍了中国地质科学院勘探技术研究所研制的 $\varnothing 185$ mm规格中空螺杆马达井底动力绳索取心钻具的基本研制情况及陆地试验情况。研制过程中, 通过理论计算和Ansys Workbench有限元仿真模拟, 对中空式螺杆马达螺旋线型的结构进行了优化设计及动力学分析, 并对万向节进行了受力安全分析, 优选了材质, 钻具攻克了多头小偏移量短节距中空转子和柔性中空万向节等关键技术, 通过在陆地开展花岗岩块取心试验, 验证了该取心钻具原理样机工作性能的可行性, 为该钻具的工程应用提供了工作参数指导及匹配钻头的优选, 也可为我国大洋钻探及深地科学钻探提供硬岩取心技术支持。

关键词:孔底动力; 中空螺杆马达; 柔性万向节; 硬岩取心; 大洋钻探

中图分类号: P634.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)05-0036-09

Development and test of hollow screw motor bottom hole power wire-line core drill

CHEN Xiaojun^{1,2,3}, SONG Gang^{1,3*}, WANG Shijun², HAN Zelong^{1,3},

ZHAO Ming^{1,3}, ZHANG Xin^{1,3}, TIAN Yingying^{1,3}

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

3. Technology Innovation Center for Directional Drilling Engineering, MNR, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: Aiming at the problems of low drilling efficiency and low coring efficiency of hard rock coring tools in ocean drilling, this paper introduces the basic development and land test of $\varnothing 185$ mm hollow screw motor bottom hole power rope coring tool developed by the Institute of Exploration Techniques, CAGS. In the development process, through theoretical calculation and Ansys Workbench finite element simulation, the spiral structure of the hollow screw motor is optimized and the dynamic analysis is carried out. The force safety analysis of the universal joint is carried out, and the material is optimized. The key technologies such as multi-head small offset short pitch hollow rotor and flexible hollow universal joint are overcome. The feasibility of the working performance of the prototype of the coring tool is verified by the coring test of granite block on land, which provides the guidance of working parameters and the optimization of matching drill bit for the engineering application of this coring tool. It can provide hard rock coring technical support for ocean drilling and deep scientific drilling in China.

Key words: bottom power; hollow screw motor; flexible universal joint; hard rock coring; ocean drilling

收稿日期: 2024-08-07 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.05.004

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: 陈晓君, 男, 汉族, 1989年生, 工程师, 博士研究生在读, 地质工程专业, 主要从事陆、海域地质钻探工艺、技术和器具等方面的研究及应用推广工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, cxiaojun@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 宋刚, 男, 汉族, 1970年生, 正高级工程师, 博士, 主要从事地质钻探、海域天然气水合物钻探工艺器具、海工装备等方面的工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, 379012534@qq.com。

引用格式: 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.

0 引言

一直以来,钻穿地壳至地幔,探索地球组成是地质学家追求的目标,陆地地壳平均厚度约17 km,而大洋地壳厚度只有几千米,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。通过大洋取心钻探从洋底收集沉积物、岩石、流体和生物体的数据和样本,了解有关地球动态历史、过程和结构等基本问题,从而揭示地球板块构造、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^[1-5]。

国际大洋钻探从DSDP、ODP再到IODP(1966—2023年)发展近60年^[6],海底硬岩取心还是以回转取心(RCB)技术为主,硬岩取心技术一直没有大的突破^[7-8]。主要原因在于大洋取心钻探施工过程中面临着既下海、又入地的双重挑战,同时,越往深钻,地层越硬,难度越大,对钻具要求越高,这也是造成国际大洋钻探硬岩取心钻效低和取心率低的关键因素,大大制约了向大洋深部钻探的发展^[9]。

与常规的RCB取心技术相比,孔底动力取心技术的最大优点是破岩过程中钻头的回转动力是依靠钻井液驱动,钻杆无需回转,这种钻进方式对钻孔的稳定性和钻杆受力更加友好,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],因此,可以搭配绳索取心钻具使用的孔底动力取心钻具也是国际大洋科学钻探(IODP)理想的取心钻具,但因其研发难度较大,一直没有大的突破。中国地质科学院勘探技术研究所(简称“勘探技术所”)在大陆科学深钻中,曾研发过“螺杆马达+绳索取心+液动潜孔锤”集成式取心器具^[12],但所使用的螺杆属于投入式的小规格螺杆,提供扭矩较小,钻进效率受限。2023年,勘探技术所在此基础上,针对硬岩地层研制了中空螺杆式孔底动力取心钻具,通过中空螺杆+绳索取心的方式实现孔底动力和快速打捞,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 取心钻具整机设计

中空螺杆马达井底动力绳索取心钻具是由中空螺杆总成和绳索取心总成两个部分组成。其中,中空螺杆总成包括中空转子马达总成、柔性中空万向节、传动轴总成、取心钻头,如图1

所示;绳索取心总成与常规取心钻具内总成结构基本相同。



图1 中空螺杆马达总成

Fig.1 Hollow screw motor assembly

取心钻具规格需求为钻孔直径 $\Phi 216$ mm,取心直径 $\geq \Phi 55$ mm,单次取心长度9.5 m,螺杆规格为 $\Phi 185$ mm,马达设计的工作排量为15~40 L/s,最大扭矩 ≥ 11500 N·m。

1.1 结构特点及工作原理

中空螺杆因为要考虑中空结构,轴向各模块需综合考虑取心钻具尺寸和螺杆结构尺寸,与传统螺杆马达的主要区别是转子和万向节部分。

中空螺杆转子使用了小偏移量短节距中空结构形式,采用多头和小摆动量的螺旋线设计,在增加扭矩的同时最大限度地提高了径向中空尺寸,同时,短节距设计可弥补因采用多线头造成的转速下降的问题^[13-14]。中空螺杆的万向节不同与传统螺杆马达的瓣式或球式万向节,它采用柔性管与上部转子和下部的传动轴直接连接,中空万向节上设计有通浆水眼,钻井液可通过水眼进入传动轴总成,也为中空万向节提供了一定的柔性,保障其在传递扭矩的同时可承受回转交变产生的侧向摆动力。

1.2 中空转子马达总成

中空转子马达总成主要由定子、中空转子组成,国内外常用的定子和转子共轭副主要有3种,分别为普通摆线等距线型、短幅摆线线型及内外摆线法线型^[15-16]。中空螺杆选择普通内摆线等距线型,这种线型应用比较广泛。在定子和转子头数选择时,主要考虑两点因素:(1)减小转子的横向振动幅度、减小偏心距;(2)转子为大通径结构,保证转子线型小径尽可能的大。马达转子的螺旋线有单头和多头之分(定子的螺旋线头数比转子多1)。转子的头数越少,转速越高,扭矩越小,转子摆动偏心距越大;头数越多,转速越低,扭矩越大,转子摆动偏心距越小;但头数也不宜过大,当头数 >10 时,过流面积会变小,导致对颗粒物的敏感性增加,加快钻具的磨损。因此,该钻具的设计头数比选择了9:10^[17-18]。

1.3 马达螺旋线结构设计及动力学计算

1.3.1 结构设计

设计的中空螺杆马达截面尺寸见图2,根据绳索取心内钻具结构需求,结合所需取心直径,转子中空直径需 ≥ 85 mm。在 $\varnothing 185$ mm与 $\varnothing 85$ mm之间的环空,需要设计定转子壁厚、橡胶螺旋硫化 and 啮合厚度^[19-20]。综合考虑螺杆定转子强度、橡胶性能和扭矩,设计螺杆线型及啮合尺寸为:中空螺杆马达定子螺旋线大径为142.6 mm,螺旋线小径为120.6 mm,马达级数为4.4级,偏心距为5.5 mm。

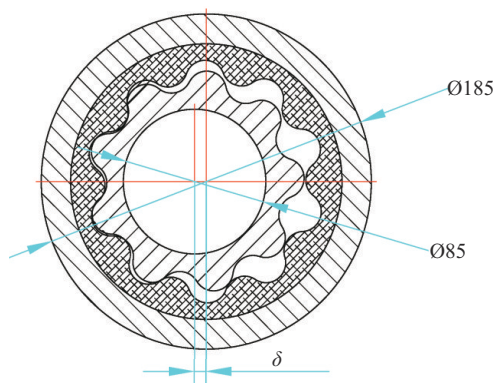


图2 Ø185 mm中空螺杆马达截面尺寸

Fig.2 Dimensions of Ø185mm hollow screw motor section

1.3.2 动力学计算

定子导程和转子导程是中空螺杆马达的重要参数,计算公式见式(1)、式(2):

$$T_s = K_T D_s \quad (1)$$

$$T_r = T_s [N/(N+1)] \quad (2)$$

式中: T_s ——定子导程; T_r ——转子导程; K_T ——导程系数; D_s ——定子线型大径; N ——中空转子头数。

中空螺杆马达的过流面积计算公式见式(3):

$$A_G = [2(N-1)\pi + 8r^0]E^2 \quad (3)$$

式中: A_G ——过流面积; E ——偏心距; N ——中空

转子头数; r^0 ——等距半径系数。

中空螺杆马达每转排量 q 计算公式见式(4):

$$q = A_G N T_s = A_G (N+1) T_r \quad (4)$$

螺杆马达的理论转速 n_T 计算公式见式(5):

$$n_T = 60Q/q \quad (5)$$

式中: Q ——排量。

马达总成压降 ΔP 计算公式见式(6):

$$\Delta P = \Delta P_k K \quad (6)$$

式中: ΔP ——马达总成压降; ΔP_k ——螺杆每级压降; K ——螺杆级数。

转子输出传递扭矩 T 计算公式见式(7):

$$T = \Delta P q / 2\pi \quad (7)$$

式中: T ——转子输出扭矩。

转子轴向载荷 G 计算公式见式(8):

$$G = \mu \Delta P E^2 [3N(N-1)\pi + 16Nr^0 + \pi(r^0)^2] \quad (8)$$

式中: μ ——轴向力系数,一般近似取1。

转子离心力,针对多头中空螺杆马达在行星运动产生得离心力为 F_g ,其计算通用公式见式(9):

$$F_g = ME\omega_{\text{公}}^2 = MEN^2\omega_{\text{自}}^2 \quad (9)$$

式中: M ——中空转子质量; $\omega_{\text{公}}$ ——中空转子公转角速度; $\omega_{\text{自}}$ ——中空转子自转角速度。

考虑转子中空结构整体质量型对于常规转子质量减轻,在计算时需减去转子中空部分,将相关参数代入通用公式可以得出式(10):

$$F_g = \frac{\gamma L \pi^2 N^2 n^2 E^3}{900g} [(N-1)(N-2)\pi + 8(N-1)r^0 + \pi(r^0)^2 - \pi R^2 L] \quad (10)$$

式中: γ ——中空转子材料密度; L ——中空转子长度; n ——转速; g ——重力加速度; R ——转子中空部分半径。

经过计算,中空螺杆马达选择普通内摆线等距线型,马达头数选择9:10,并在此基础上对螺旋线型进行优化,性能参数如表1所述。

表1 Ø185 mm中空螺杆马达性能参数

Table 1 Performance parameters of Ø185mm hollow screw motor

规格 型号	转子/定子 头数	钻孔直径/ mm	扭矩/ (N·m)	轴向力/N	离心力/N	每转排量/ (L·r ⁻¹)	压降/ MPa	钻速/ (r·min ⁻¹)
185	9:10	216	12401	159944	1230	14.43	5.4	62~166

2 柔性中空万向节设计分析

为满足中空螺杆硬岩绳索取心9.5 m取心长度设计需求,根据轴向结构计算,万向节的全长为5200 mm,柔性中空万向节结构见图3所示。



图3 柔性中空万向节

Fig.3 Flexible hollow universal joint

柔性中空万向节是中空螺杆钻具的关键部件,其上端与中空螺杆马达的转子连接,下端与传动轴连接,工作时做回转和偏心的圆周运动,承受载荷比较复杂,不仅有扭矩,还有轴向力和偏心回转的挠性力,根据力的传递性,偏心回转的挠性力等效为中空螺杆马达的离心力^[21],受力简化模型见图4。

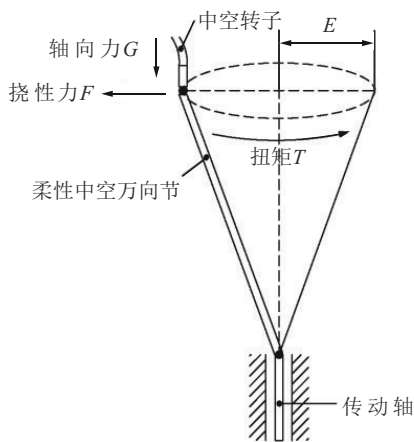


图4 柔性中空万向节受力模型

Fig.4 Force model of flexible hollow universal joint

2.1 柔性中空万向节长度及外径设计

柔性中空万向节在满足 $\varnothing 85$ mm内径前提下,分别选择45号碳素钢、42CrMo高强度合金钢以及TC4钛合金3种材质,使用Ansys Workbench软件,对其结构进行受力分析校核,并针对万向节通浆孔处造成的应力集中进行了模拟分析,优选柔性中空万向节材料和结构参数^[18-20],所选材料性能参数见表2。

2.1.1 理论计算

柔性中空万向节的壁厚会直接影响传扭能力,为保证柔性中空万向节工作状态的稳定,需计算万向节的直径。在设计过程中,可将万向节近似看作传动轴中的空心转轴,因此选用空心转轴的弯扭合

表2 材料性能参数

Table 2 Material property parameter

材料	弹性模量/ GPa	泊松比	弯曲许用应力/ MPa	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa
45号钢	2.09	0.3	55	4510	1080	355
42CrMo	2.07	0.3	95	7895	600	930
TC4	1.1	0.34	90	7895	1100	990

成强度轴径计算方法,计算公式见式(11);

$$d = 21.68 \sqrt[3]{\frac{M^2 + (\phi T)^2}{\sigma_{-1p}}} \times \frac{1}{\sqrt[3]{1 - \alpha^4}} \quad (11)$$

$$M = Fl$$

式中: d ——万向节直径; M ——弯曲应力; σ_{-1p} ——弯曲许用应力; T ——扭矩; F ——离心力; l ——万向节长度; ϕ ——校正系数; α ——内外径比例系数。

校正系数 ϕ 值是由扭应力的变化来决定的:扭应力不变时, $\phi=0.3$;扭应力按脉动循环变化时, $\phi=0.6$;扭应力按对称循环变化时, $\phi=1$ 。根据中空螺杆马达井底动力绳索取心钻具工作特性,扭应力基本维持恒定 ϕ ,取0.3, σ_{-1p} 是弯曲许用应力,柔性中空万向节工作时是对称循环弯曲应力作用。

将设计的中空马达性能参数带入公式分别算出3种材料的最小轴径分别:45号钢为 $\varnothing 117.1$ mm、42CrMo为 $\varnothing 105.3$ mm、TC4为 $\varnothing 106.3$ mm。

2.1.2 仿真力学分析

根据柔性中空万向节的工作状态,在其下端施加固定约束,上端施加设计的中空马达性能参数:Y方向的弯矩1230 N、扭矩为12401 N·m以及轴向力159944 N。通过Ansys Workbench对柔性中空万向节仿真分析,仿真分析云图如图5所示,3种材料的最大应力分别为:45号钢为134.06 MPa、42CrMo为234.13 MPa、TC4为222.45 MPa。

综合考虑中空螺杆马达井底动力绳索取心钻具的工作环境以及工作特点,柔性中空万向节的许用安全系数 n 选择2.5,根据许用应力计算公式 $[\sigma] = \sigma_s/n$ 。可得3种材料的许用应力分别为:45号钢为142 MPa、42CrMo为372 MPa、TC4为352 MPa,其最大应力均小于许用安全应力,万向节的使用强度和刚度满足使用要求。

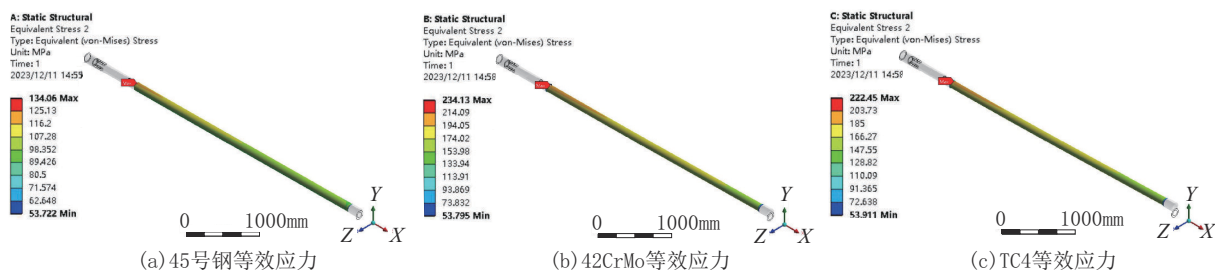


图5 柔性中空万向节仿真分析云图

Fig.5 Cloud image of flexible hollow universal-joint simulation analysis

2.2 柔性中空万向节通浆孔设计分析

柔性中空万向节为内孔 $\varnothing 85$ mm的直杆设计,为满足其工作时的通浆需求,同时当外径 $\varnothing 73$ mm的岩心管置入后不能形成压降,按其环状间隙1.3倍的冗余,在其下端设计有4个 $\varnothing 25$ mm \times 85 mm的椭圆孔作为通浆孔,考虑开孔将会在此处造成应力集中,对其进行数值模拟分析。

通过Ansys Workbench有限元仿真分析通浆孔

的应力,分别对3种材料进行分析,其中45号钢轴径依然选择117.5 mm,42CrMo和TC4理论计算轴径相近,为便于对比分析,二者轴径选择106.5 mm。

柔性中空万向节的下端施加固定约束,上端施加Y方向的弯矩1230 N、扭矩12401 N \cdot m以及轴向力159944 N。通过Ansys Workbench对万向节仿真分析,结果如图6所示。

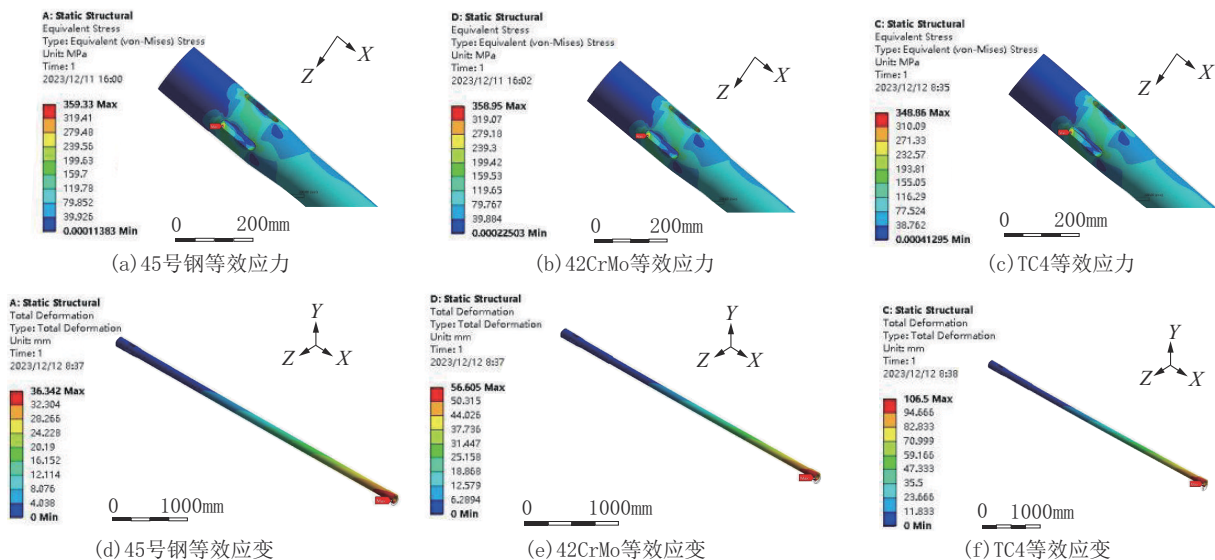


图6 通浆孔仿真分析云图

Fig.6 Cloud image of mud-through hole simulation analysis

分析结果如表3所示,通过仿真分析结果可知,45号钢不满足设计要求,42CrMo和TC4均满足性能要求,TC4材料还具有防蚀能力,非常适合在海上施工,但综合考虑42CrMo和TC4的材料及加工成本,中空螺杆原理样机优先采用42CrMo进行陆地实验,可行性通过后再更换更优质的TC4材质。

表3 通浆孔仿真分析结果汇总

Table 3 Summary of simulation analysis results of mud-through hole

材料	通浆孔最大应力	许用应力/MPa	万向节总变形量/mm	是否满足
45号钢	359.33	142	36.342	否
42CrMo	358.95	372	56.605	是
TC4	348.96	352	106.500	是

3 陆地试验测试

3.1 试验场地及设备

为验证中空螺杆马达井底动力绳索取心钻具的可行性设计,在陆地开展中空螺杆硬岩取心钻具的试验是更为经济有效的方式。在试验场地提前预埋花岗岩岩块,采用SDC-2500型车载钻机,配备RL-F1300型泥浆泵进行取心试验,选用设备见图7。



(a) SDC2500型车载钻机



(b) RL-F1300型泥浆泵

图7 试验设备

Fig.7 Equipment for tests

3.2 取心器具

为充分验证中空螺杆马达井底动力绳索取心钻具的工作性能,分别配套了牙轮取心钻头、金刚石取心钻头、PDC六刀翼取心钻头及PDC八刀翼取心钻头进行试验,如图8所示。选取单轴抗压强度为125 MPa花岗岩作为模拟取心地层。

3.3 陆地取心试验

3.3.1 短距离取心试验

在浅表预埋1.2 m厚花岗岩块,见图9,进行取心钻进试验,在10个取心孔位共进行10轮次取心,分别测试了牙轮取心钻头、金刚石取心钻头、PDC六刀翼取心钻头以及PDC八刀翼取心钻头在不同



图8 硬岩取心钻头

Fig.8 Hard rock coring bit

泥浆泵排量和钻压条件下的取心效果,泥浆泵排量参考了广州海洋地质调查局海洋地质十号船的泥浆泵设备参数,其最大排量 ≤ 27 L/s。表4是取心工艺参数以及取心数据。



图9 预埋花岗岩岩块

Fig.9 Pre-buried granite blocks

取心情况如图10所示,不同取心钻头短距离取心结果分析:牙轮取心钻头受破岩方式的影响,在浅表无法获取较高质量岩心,并存在在磨心、丢心的情况,平均取心率仅达53.1%,平均钻效2.96 m/h;金刚石取心钻头在花岗岩地层取心质量较高,但其钻进效率仅为0.88 m/h,其主要原因为该钻具未达到金刚石钻头所需的线速度;PDC六刀翼取心钻头 and PDC八刀翼取心钻头均能获得极高的取心率,平均钻效达到13.66 m/h,并且PDC取心钻头取出2段完整的1.2 m岩心,证明其取心质量较高,可满足长回次取心需求。

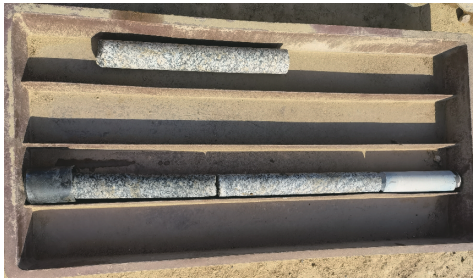
表 4 不同取心钻头短距离取心试验数据

Table 4 Short distance coring test data of different coring bits

孔位	钻 头	泵排量/(L·s ⁻¹)	泵压/MPa	钻压/kN	用时/min	进尺/m	获取岩心/m	取心率/%	钻效/(m·h ⁻¹)
1	牙轮	38	6	97.55	13	1.2	0.7	58.3	5.54
2	牙轮	38	6	85~90	18	1.2	0.8	66.7	4.00
3	牙轮	38	5	70	39	1.2	0.55	45.8	1.85
4	牙轮	28	3.5	70	27	1.2	0.50	41.7	2.67
5	金刚石	38	5	85	82	1.2	1.2	100	0.88
6	PDC(六刀翼)	28	3.5	60	5	1.2	1.20	100	14.40
7	PDC(六刀翼)	28	3.5	60~80	7	1.2	1.20	100	10.29
8	PDC(六刀翼)	38	5.5	60	4.5	1.2	1.20	100	16.00
9	PDC(八刀翼)	28	3	60	7.5	1.2	1.00	83.3	9.60
10	PDC(八刀翼)	38	4	70	4	1.2	1.2	100	18.00



(a)牙轮取心



(b)金刚石取心



(c)PDC六刀翼取心



(d)PDC八刀翼取心

图 10 不同取心钻头取心效果对比

Fig.10 Comparison of the coring results with different core bits

3.3.2 长回次取心试验

根据地表短距离取心效果,将外形尺寸为4块2.1 m×0.63 m×0.63 m的花岗岩块纵向叠放至9 m长的Ø920 mm钢管中,底部焊接封口后置入预设的Ø1000 mm孔内,花岗岩岩块与卷管之间灌入混凝土固定,制备了约8.4 m的硬岩地层。分别采用六刀翼和八刀翼的PDC取心钻头进行了4轮次的长回次取心试验,试验结果见表5,取心情况见图11。

经分析,对比PDC六刀翼和八刀翼取心钻头发现,钻压变化对PDC钻头取心效率影响较大,钻压越高,钻效越高;在取心质量和取心率方面的表现基本相同,取心率全部为100%。在取心效率方面,六刀翼PDC取心钻头是八刀翼的1.53~2.1倍。

4 结论

(1)研制的中空螺杆马达井底动力绳索取心钻具原理上具有较强的可行性,但由于中空螺杆结构的特殊性,其综合使用性能及寿命还需要工程施工案例进行验证。

(2)设计的多头小偏移量短节距中空转子和柔性中空万向节结构原理及使用功能是可行的,可有效降低中空螺杆钻具转子偏移量,满足岩心高质量获取的目的。

(3)一体式柔性万向节,将传统螺杆的万向节部件集成至螺杆转子上,不仅解决了螺杆转子下悬挂难的问题,同时,为钻具提供了更长的岩心管储放空间。

(4)使用中空螺杆马达井底动力钻具时,PDC

表 5 PDC 取心钻头连续长距离取心试验
Table 5 Continuous long distance coring test of PDC coring bit

孔位	钻 头	泵排量/(L·s ⁻¹)	泵压/MPa	钻压/kN	用时/min	进尺/m	获取岩/m	取心率/%	钻效/(m·h ⁻¹)
1	PDC(六刀翼)	28~32	4~5	70	23	6.8	6.8	100	17.74
2	PDC(六刀翼)	32	4.5	60	27	7.4	7.4	100	16.44
3	PDC(八刀翼)	40	5	70	40	7.7	7.7	100	11.55
4	PDC(八刀翼)	32	4.5	60	31	4.2	4.2	100	8.13

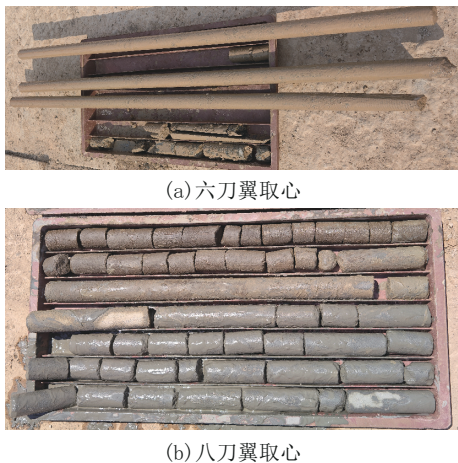


图 11 六刀翼和八刀翼 PDC 取心钻头岩心质量及长度
Fig.11 Core quality and length of six-blade and eight-blade PDC core bits

取心钻头在取心效率和取心质量上都优于牙轮钻头,在取心质量方面金刚石取心钻头最佳,但效率最差,综合陆地实验对比分析,采用六刀翼 PDC 钻头更适合在花岗岩地层快速取心。

(5) 研究中,该钻具仅在地表浅层进行了取心试验,同较深的硬岩取心钻探条件下钻具的工作环境有一定的差距,相关工作参数还需进行深孔、多轮次试验,进一步验证其工作性能。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] 汪品先.从南海 10 年展望深海科技前景[J].前瞻科技,2022,1(2):9-19.
WANG Pinxian. Decadal survey in the South China sea: Prospects of deep-sea technologies[J]. Science and Technology Foresight, 2022,1(2):9-19.

[3] 汪品先.大洋钻探与中国的海洋地质[J].海洋地质与第四纪地质,2019,39(1):7-14.

WANG Pinxian. Ocean drilling and marine geology in China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 39(1):7-14.

[4] 汪品先,翦知潜.探索南海深部的回顾与展望[J].中国科学(地球科学),2019,49(10):1590-1606.
WANG Pinxian, JIAN Zhimin. Review and prospect of exploring the deep south china sea[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2019, 49(10):1590-1606.

[5] 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.

[6] 贾向锋,李亚伟,赵涛.大洋钻探船钻探系统装备现状及总体配置研究[J].船舶,2023,34(5):67-76.
JIA Xiangfeng, LI Yawei, ZHAO Tao. State-of-the-art and overall configuration of drilling system equipment for ocean drilling vessels[J]. Ship & Boat, 2023, 34(5):67-76.

[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] 马汉臣,王嘉瑞,刘凡柏,等.浅海活塞压入取心工艺研究附视频[J].钻探工程,2023,50(S1):387-391.
MA Hanchen. WANG Jiarui, LIU Fanbai, et al. Research on shallow sea piston pressure core extraction technology with video[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1):387-391.

[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] 韩泽龙,宋刚,陈晓君,等.震击型中空螺杆取心钻具钻进效率分析[J].钻探工程,2023,50(3):54-59.
HAN Zelong, SONG Gang, CHEN Xiaojun, et al. Analysis of drilling efficiency of shock hollow screw coring tool[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3):54-59.

[11] 张会寅,田烈余,林康,等.海上顶部双驱动联动隔水管钻探取心技术[J].钻探工程,2022,49(6):110-115.
ZHANG Huiyin, TIAN Lieyu, LIN Kang, et al. Ocean core drilling with the top double-drive linkage riser system[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6):110-115.

[12] 王年友,谢文卫,冯起赠,等.绳索取心、液动潜孔锤、螺杆马达“三合一”钻具[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(S1):45-47.
WANG Nianyou, XIE Wenwei, FENG Qizeng, et al. “Three

- into One" drilling tool which combined wire line core, hydro-hammer and PDM[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2005, 32(S1):45-47.
- [13] 王兴坤, 罗西超, 刘凤, 等. 深井大扭矩螺杆钻具研究现状与应用情况[C]//2023油气田勘探与开发国际会议(2023IFEDC)会议论文集. 武汉, 2023:1-8.
- WANG Xingkun, LUO Xichao, LIU Feng, et al. Research status and application of deep well high torque screw drilling tools[C]//Proceedings of the International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development (2023IFEDC). Wuhan, 2023:1-8.
- [14] MA Z F. The structure optimisation of hydraulic mechanical screw pump[J]. Int. J. of Simulation and Process Modelling, 2019, 14(1):28-35.
- [15] 苏义脑, 于炳忠, 谢竹庄. 单螺杆钻具马达线型分析[J]. 石油学报, 1986, 7(4):95-109.
- SU Yinao, YU Bingzhong, XIE Zhuzhuang. Analysis of conjugate contours in matching stator-rotor cross-section of moineau-type positive displacement drilling motor[J]. Acta Petrolei Sinica, 1986, 7(4):95-109.
- [16] 苏义脑, 谢竹庄. 单螺杆钻具马达普通内摆线等距线型分析[J]. 石油机械, 1986(2):15-27, 68-69.
- SU Yinao, XIE Zhuzhuang. Analysis of the equidistant profile of the ordinary internal cycloid of the single screw drilling tool motor[J]. China Petroleum Machinery, 1986(2):15-27, 68-69.
- [17] YAN Y W, LI Z G, JING H Q, et al. Design calculation and practice of key structure for no load start-up of hydraulic driven screw pump[C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Application of Materials Science and Energy Materials, Tianjin China, 2020:661-666.
- [18] 唐剑. 基于螺杆马达的旋冲钻具设计与仿真[D]. 荆州: 长江大学, 2021.
- TANG Jian. Research on Structure design and simulation of bi-directional Impactor[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2021.
- [19] 赵娜. 螺杆钻具马达线型优化设计方法的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.
- ZHAO Na. Screw drill motor linear optimization design method research[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2016.
- [20] 张锐尧, 叶道辉, 肖平, 等. 螺杆钻具瓣齿式万向轴密封结构流固耦合分析[J]. 石油机械, 2023, 51(10):9-15.
- ZHANG Ruiyao, YE Daohui, XIAO Ping, et al. Fluid-Solid coupling analysis on the seal structure of flap toothed Universal shaft of PDM[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(10):9-15.
- [21] 金兄珍, 冯贤. 万向节十字轴失效分析及优化设计[J]. 汽车工艺师, 2022(3):58-60.
- JIN Xiongzheng, FENG Xian. Failure analysis and optimization design of universal joint cross shaft[J]. Modern Components, 2022(3):58-60.

(编辑 王文)