

Ø215.9 mm 四牙轮取心钻头设计与应用

赵明, 邵玉涛, 宋刚, 崔淑英, 牛庆磊, 王嘉瑞

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000)

摘要: 针对硬岩及复杂地层取心钻进效率低、钻头寿命短的问题, 依托“深海钻探技术与工程支撑”项目研制了Ø215.9 mm 四牙轮取心钻头。通过合理布置牙轮角度与分布、优化取心结构, 有效提高岩心采取率, 保证钻头在硬岩中的钻进速度与可靠性。在之前进行了陆地试验和海洋试验并不断优化改进的基础上, 本次在内蒙古自治区呼和浩特市清水河县首次进行了实验性的地热勘探取心施工, 全段地层均为高研磨性、高硬度花岗岩, 取心困难。采用Ø215.9 mm 牙轮取心钻头配合常规的取心钻具, 钻进效率达1.2 m/h, 岩心采取率为70%~90%, 取得了较好的应用效果, 为海洋钻探硬岩取心提供了技术保障。

关键词: 四牙轮取心钻头; 复杂地层; 钻进效率; 钻头寿命; 地热勘探井; 海洋钻探; 硬岩取心

中图分类号: P634.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2022)01-0041-08

Design and application of Ø215.9mm four-cone coring bit

ZHAO Ming, SHAO Yutao, SONG Gang, CUI Shuying, NIU Qinglei, WANG Jiarui

(Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: The Ø215.9mm four-cone coring bit is a cone coring bit designed and produced under the project of "Deep Sea Drilling Technology And Engineering Support", and is mainly used for high-efficiency and long-run coring in hard rock and complex strata. By reasonably arranging the cone angle and distribution, and optimizing the coring structure, core recovery can be effectively improved to ensure the drilling rate and reliability of the bit in hard rock. Land test and marine test had been conducted for continuous optimization and improvement of the bit; and experimental geothermal exploration coring was carried out for the first time in Qingshuihe county, Hohhot city, Inner Mongolia autonomous Region. The whole coring section is granite of high abrasiveness and high hardness, and difficult to core. With the combination of the Ø215.9mm cone coring bit with conventional coring tools, drilling speed reached 1.2m/h with core recovery of 70%~90%. It has good application value and can provide technical support for marine drilling hard rock coring.

Key words: four-cone coring bit; complex strata; drilling efficiency; bit life; geothermal exploration well; marine drilling; hard rock coring

0 引言

海洋是地球生物的发源地,也是地球重要的资源供应地和能源基地,开发海洋清洁能源能够长久满足人类的需要^[1]。自1968年国外就开始进行了漫长的海洋科学钻探之旅,至今为止,共在海洋中完成4000多口井的钻进,成功获得了超过40万 m

岩心,对于了解地球气候演变、板块构造发展以及海洋资源掌握等方面做出了突出的贡献^[2-3]。

21世纪是海洋的世界。我国海洋面积广阔,拥有丰富的资源,但是由于海洋能源的开采勘探与开发起步较晚,导致我国海洋能源技术装备严重不足,且国外对于海洋装备设计图纸和制造工艺严密

收稿日期:2021-09-30; 修回日期:2022-01-02 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.01.006

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“深海钻探技术与工程支撑(中国地质科学院勘探技术研究所)”(编号DD20190585)

第一作者:赵明,男,汉族,1994年生,助理工程师,机械工程专业,硕士,主要从事海洋钻探技术研究等工作,河北省廊坊市市金光道77号,526751308@qq.com。

引用格式:赵明,邵玉涛,宋刚,等.Ø215.9 mm 四牙轮取心钻头设计与应用[J].钻探工程,2022,49(1):41-48.

ZHAO Ming, SHAO Yutao, SONG Gang, et al. Design and application of Ø215.9mm four-cone coring bit[J]. Drilling Engineering, 2022,49(1):41-48.

封锁,各种钻具均拒绝出售。我国要进行海洋能源的开采,首先需要对海洋能源总量以及分布状况进行掌握,目前对于海洋能源的掌握主要是通过物化探的方法进行资源总量的估算,而要实现精确掌握是摆在我们面前的一道难题,最直观的办法就是通过钻探取样获取样品,因为样品是最直观、最可靠地反映岩层地质特征的第一手资料^[4]。而我国缺少自己的大洋钻探船和与之配套的钻井取心器具,这严重制约了我国进行海洋科学钻探,寻找海洋能源。因此我国在“十四五”海洋经济发展规划中提出要加快构建现代化海洋产业体系,着力提升海洋科技自主创新能力,不仅要建设制造自己的万米钻探船,还要开发与钻探船配套的相关钻井取心器具。随着海洋能源的需求不断增大,海洋钻探取心器具也在飞速发展,但在深海钻探过程中,硬岩以及复杂地层高效钻进取心还没有成熟的工艺与器具,在钻进取心过程中,最重要的是选择高效破岩的取心钻头。为了服务于万米钻探船的钻探系统,研究并设计生产能够在硬岩以及复杂地层高效钻进的取心钻头成为迫切需要解决的问题^[5]。

牙轮钻头具有地层适应性广、钻进效率高的特点,是硬岩以及复杂地层的首选钻头。但是一般的牙轮钻头并不具备取心功能,主要是进行全断面钻进,将牙轮钻头与取心结合起来既能够进行高效钻进,又能够完成取心工作。

牙轮取心钻头曾经在大陆科学钻探硬岩钻进取心中使用。1970年,苏联在科拉半岛进行大陆超深钻探,全井在高研磨性、高硬度结晶岩中钻进,除使用一种镶有超硬材料“斯拉乌季契”的钻头外,均应用牙轮取心钻头,主要分为镶齿四牙轮与六牙轮取心钻头2种,取心直径为60~80 mm,总取心工作量为9235.2 m,取得岩心长度为3700.1 m,平均取心率为40.1%,其中岩心采取率最高为59.7%,是采用B-K214/60TKZ镶齿四牙轮取心钻头获得的^[6]。

1987年德国大陆科学钻探(KTB)进行先导孔的钻进,取心钻进3594 m,牙轮取心钻头钻进为451 m,共使用2种规格的牙轮取心钻头,分别为10 $\frac{5}{8}$ in (1 in=25.4 mm,下同)与6 in,其中10 $\frac{5}{8}$ in取心钻头结构有四牙轮与六牙轮2种,配常规双层岩心管取心,岩心直径为4 in,共钻进448.1 m,取心长度192.04 m,平均岩心采取率为42.9%,这其中包括一次金刚石钻进取心,但是该金刚石取心钻头被磨掉

1/2 m,结果表明结晶岩中不能使用大唇面的金刚石钻头钻进^[7]。

1990年德国大陆科学钻探(KTB)进行主孔的钻进,从4149 m开始,使用14 $\frac{3}{4}$ in取心牙轮钻头和标准的双层岩心管进行点取心钻进,岩心直径为4 in,总取心长度为140.7 m,岩心总长度为54.79 m,平均岩心采取率为38.94%,平均钻速为0.87 m/h,平均钻头寿命20.1 m,由于岩心管采取率低,尝试了一些新的技术方法,最终都未取得成功。在三开钻进阶段,分别使用了12 $\frac{1}{4}$ in牙轮取心钻头与专用大口径金刚石取心钻头(LDCS)。其中12 $\frac{1}{4}$ in牙轮取心钻头配标准的双层岩心管进行点取心钻进,岩心直径为4 in,总取心长度为25.0 m,岩心总长度为12.8 m,平均岩心采取率为51.2%,平均钻速为0.82 m/h,平均钻头寿命6.25 m;专用大口径金刚石取心钻头总取心钻进长度为21.5 m,岩心总长度为15.38 m,平均岩心采取率为73.6%,平均钻速为0.42 m/h,平均钻头寿命5.38 m。通过两者对比可发现设计的专用大口径金刚石取心钻头在岩心采取率提升超过20%,但是平均钻速下降48%^[8]。

而国内在硬地层中牙轮取心钻头应用较少,1982年辽河油田钻井指挥部在曙古32-16井使用了2只型号为216XQ6的 \varnothing 216 mm牙轮取心钻头。第一只钻头取心井段1530.15~1534.89 m,地层为硅质白云岩,取心长度4.74 m,岩心长0.37 m,岩心采取率7.8%,钻压10~80 kN,转速68 r/min,排量20 L/s,起出钻具发现3个外牙轮的外齿圈和保径齿磨损严重,外齿圈几乎磨平,整个钻头外径磨少3.5 mm;第二只钻头取心井段2323.03~2325.40 m,地层为破碎石英岩,取心长度2.47 m,岩心长1.0 m,岩心采取率40.5%,钻压10~100 kN,转速63~68 r/min,排量25 L/s,起出钻具发现钻头牙掌磨损严重,6个牙轮均松动,轴承磨损严重,1个内牙轮轴断,3个内牙轮均向内挤,钻头体内径磨损,3个外牙轮的外齿圈和保径齿磨损严重,外牙轮保径面磨平,整个钻头外径磨少2.5 mm。在使用六牙轮取心钻头之前,使用过1只 \varnothing 190 mm硬质合金取心钻头,取心井段2315.15~2315.47 m,进尺0.32 m后无进尺被迫起钻,岩心采取率为0,钻压100~130 kN,转速、排量与六牙轮取心钻头试验相同。对比两者发现牙轮取心钻头用于中硬以上地层相对较理想,特别是在破碎性硬地层中,比金刚石取心钻头效果要好^[9]。

而在国外的海洋科学钻探(ODP)中,最常用的取心钻头为牙轮取心钻头,可用于中硬度以上地层,对于研磨性高、坚硬的沉积岩或火成岩还设计了一种专用的旋转取心工具(RCB),其使用的主钻头也为一种四牙轮取心钻头,取心直径为58.7 mm,双层取心筒为外筒随钻柱转动而内筒固定不动,平均岩心采取率在20%~55%之间^[10-12]。

基于以上研究,金刚石取心钻头不适用于中硬以上地层及破碎性硬地层,牙轮取心钻头滚破岩效果良好,球齿具有高耐磨性和高强度,能够满足高研磨性硬地层以及破损性硬地层需要,但是其取心率最高不超过60%。为了解决海洋钻探硬岩以及复杂地层高效钻进取心问题,开展长寿命高效牙轮取心钻头研发与应用是极其必要的。

1 牙轮取心钻头设计

1.1 结构设计

牙轮取心钻头在深海钻探应用主要面临钻头使用寿命短、钻进效率低、岩心采取率低等一系列问题^[13-15]。基于此,通过合理布置牙轮角度与分布、优化取心结构,设计研发了一种新型的Ø215.9 mm四牙轮取心钻头(见图1),该钻头能够有效提高岩心采取率,并保持较高的钻进速度以及较长的使用寿命,便于较好地应对海上作业时间窗口窄、硬岩岩心采取率低等问题。该钻头主要由胎体、牙掌、牙轮以及修正硬质合金条等部分组成(见图2)。牙掌采用四牙掌啮合设计(见图3),牙掌切削齿、外排齿及背锥齿加密布置,切削方向设计4个喷嘴,有效提高牙掌使用寿命。牙掌的布置方式为2个牙掌保外径,2个牙掌保内径。



图1 Ø215.9 mm 牙轮取心钻头实物

Fig.1 Ø215.9 mm cone coring bit

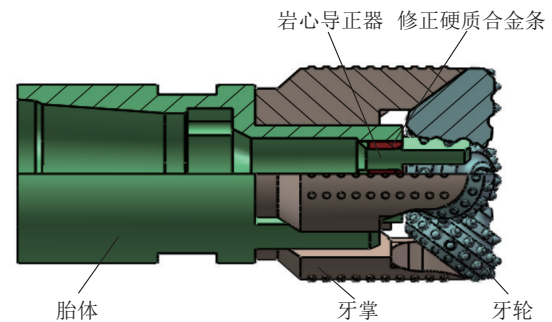


图2 Ø215.9 mm 牙轮取心钻头三维图

Fig.2 Three dimensional drawing of Ø215.9mm cone coring bit

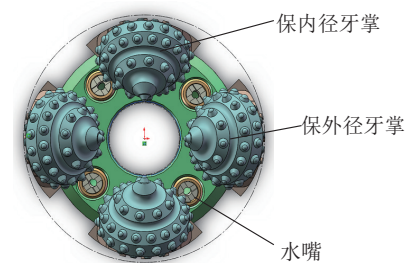


图3 牙轮取心钻头牙掌布置

Fig.3 Layout of the cones

牙掌是牙轮取心钻头中最重要的部件,它决定了牙轮取心钻头是否能够高效长寿命地工作。牙掌的选型主要从以下方面进行:镶齿齿形、轴承形式、密封形式、牙掌背部及背锥。

根据地层情况合理选择齿形形状、大小、数量及长短^[16]。图4示出了各种镶齿齿形。球形与尖卵形适合高研磨坚硬地层,如石英岩、玄武岩、花岗岩等,圆锥形与楔形适合灰岩、白云岩、砂岩、石英岩等研磨性高的硬岩层,锥勺形与边楔形适合破碎高塑性的软及中硬度地层,勺形适合破碎及软至中软岩层^[17]。本项目为硬岩层钻进,选择的齿形为尖卵形齿。

虽然滚动轴承比滑动轴承摩擦阻力小、启动快、效率高,但是由于其内部为滚珠结构,与滑动轴承相比,滚动轴承承载力较低,减震能力与抗冲击性能差^[18-19],因此牙掌采用滑动轴承形式,工作状态下承载力大、切削稳定,密封形式采用复合密封,有效保证钻头使用寿命与平稳度,润滑形式采用储油补偿系统,工作过程根据井底压力自动补偿润滑,保证钻头使用寿命^[20]。图5为牙掌密封形式对比图。

牙掌背锥分为单排背锥布齿和双排背锥布齿,

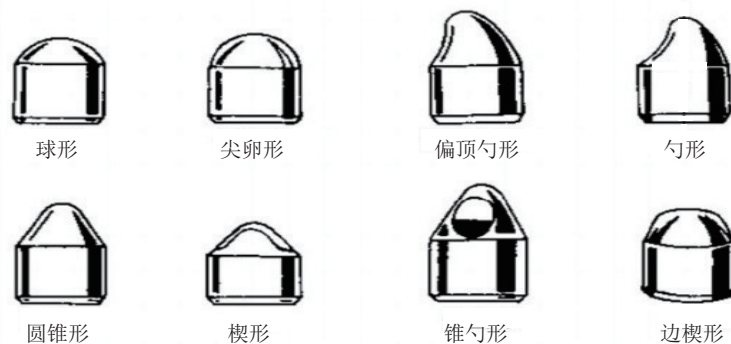


图4 牙掌齿形形式

Fig.4 Forms of the cone teeth

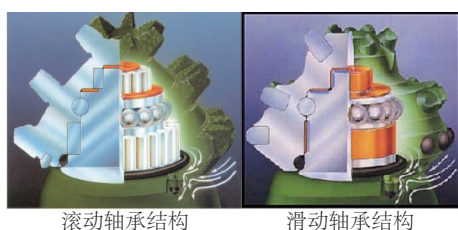


图5 牙掌密封形式

Fig.5 Sealing forms of the cone

如图6所示,双排背锥布齿由于其受力均匀,有助于使用寿命的提高,还能够有效提升破岩效率,防止钻头缩径,因此选择高密度双排背锥布齿^[21-22]。牙掌背部布齿的稀密程度直径影响钻头使用寿命,背部齿能有效保护油囊、提高钻头稳定性、保证钻孔口径。因此,对牙掌背部布齿进行优化,尽可能地增加背部齿数^[23]。

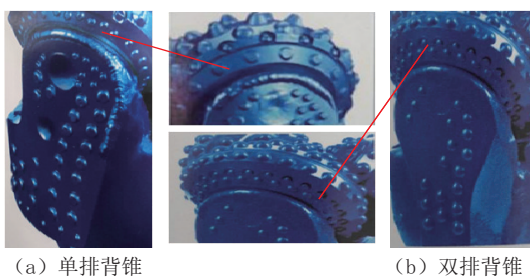


图6 牙掌背及背锥形式

Fig.6 Shape of the cone back

该牙轮钻头具有以下优势:

(1)偏射四喷嘴设计使泥浆在井底能够形成涡流,加快岩屑的上返速度。

(2)四牙轮啮合加密合金齿设计,能够提高合

金切割效率,进尺快且钻进平稳。

(3)牙轮取心钻头中间设计岩心导正器,通过超前导正保护减少钻进过程对岩心的冲击破坏,有效提高岩心采取率,并且岩心导正器内部设计4条修心硬质合金,保证岩心尺寸,提高岩心质量。

(4)牙轮钻头内部设计有传扭键槽,通过更换全断面钻头钻具,实现全断面钻进,能够不提钻完成取心和全面钻进的切换。

1.2 技术参数

该牙轮取心钻头主要技术参数如表1所示。

表1 牙轮取心钻头主要技术参数

Table 1 Technical parameters of the cone coring bit

参数名称	参数值
钻探直径/mm	215.9
岩心直径/mm	55
与钻柱连接螺纹扣型	5½ in IF
牙轮数量/只	4
轴承系统	滑动轴承
密封系统	复合密封
齿排数/排	16
切削齿/颗	137
外排齿/颗	35
背锥齿/颗	35
掌背齿/颗	104
金刚石复合齿/颗	16

2 现场应用

2.1 钻探工程概况

为了进一步开展硬岩牙轮取心钻头的试验,完善钻头设计,在陆地开展试验是更为经济的一种方

式。“清水河地区地热资源可行性预查”为呼和浩特市国土局组织地勘单位申报的地热勘察基金项目,主要是通过此次地热勘察井了解清水河地区地热资源,助力呼和浩特市地热相关产业和旅游业的发展^[24]。项目于2020年10月初实施,该井为垂直井施工,本次施工应保证其垂直钻进,300 m内应保证孔斜 $\leq 1^\circ$,1000 m应保证孔斜 $\leq 3^\circ$,终孔应保证孔斜 $\leq 7^\circ$ 。该地区地层主要为花岗岩,普氏硬度系数 $f=15$,可钻性较差,机械钻速低且取心难度较大^[25],具备开展硬岩牙轮取心钻探技术验证的理想条件。

2.2 井身结构

该井设计井深为2200 m,一开使用 $\varnothing 445$ mm牙轮钻头开孔,钻至500 m,下 $\varnothing 339.7$ mm套管进行固井,二开使用 $\varnothing 215.9$ mm PDC钻头钻至设计井深,裸眼。

2.3 钻探设备及钻具组合

该井使用GZ-2600型工程钻机施工(图7),转盘转速共有4挡,分别为43、63、93、156 r/min,最大钻进深度($\varnothing 89$ mm钻杆)为2600 m。一开钻具组合为: $\varnothing 127$ mm钻杆+ $\varnothing 89$ mm钻杆+ $\varnothing 203$ mm钻铤+ $\varnothing 444.5$ mm牙轮钻头。二开钻具组合为: $\varnothing 127$ mm钻杆+ $\varnothing 89$ mm钻杆+ $\varnothing 178$ mm钻铤+ $\varnothing 215.9$ mm PDC钻头。取心井段钻具组合为: $\varnothing 127$ mm钻杆+ $\varnothing 89$ mm钻杆+ $\varnothing 178$ mm钻铤+常规取心管+ $\varnothing 215.9$ mm牙轮取心钻头。



图7 GZ-2600型工程钻机
Fig.7 GZ-2600 drilling rig

2.4 取心过程

该井0~500 m不进行取心,500~2200 m,每隔100 m取心1次,单次取心长度 < 1 m,由于该地层为高研磨性、高硬度花岗岩,在500~800 m段曾采用薄壁金刚石取心钻头取心1次,钻头磨损较严重,另还使用PDC取心方式进行取心,取心效果不理想,取心不够完整,未形成柱状岩心。800 m以后使用本项目研发的牙轮取心钻头进行硬岩取心,试验工

艺流程如表2所示。

表2 试验工艺流程
Table 2 Test process

工序流程	步骤	流程事项
钻具准备	1	测量钻具长度,进行配长
	2	将牙轮取心钻头、变径接头与外取心管进行连接
	3	将卡簧座与内取心管下端连接,上端与内取心管固定装置连接
	4	内取心管整体放入岩管中,卡簧座下端到达牙轮取心钻头内部台阶处
牙轮取心试验	5	将钻头盒放入孔口处
	6	将组装好的钻具使用副卷扬吊至孔口,牙轮取心钻头座至钻头盒内
	7	连接 $\varnothing 178$ mm钻铤与变径接头,紧扣,提起钻具,取钻头盒
	8	下钻,下至距井底2 m处
	9	开启泥浆泵回转钻进
	10	开始钻进,转速为1挡(43 r/min),泵量8~12 L/s
	11	逐渐提高转速2挡(63 r/min),泵量保持8~12 L/s
	12	钻进一定深度提钻取心
	13	完成钻孔钻具与钻头拆卸与检查维护保养,重新组装

2.4.1 第一回次取心

2021年4月11~12日完成了第一回次取心。钻进至891.06 m后提钻,更换 $\varnothing 215.9$ mm牙轮取心钻头及取心钻具,如图8所示。

按照设计要求连接钻杆钻具,外管钻具为



图8 第一回次取心钻进牙轮取心钻头钻具组合
Fig.8 Coring drilling BHA from the first coring-run

Ø215.9 mm 牙轮取心钻头+Ø178 mm 双管单动取心管+Ø127 mm 钻铤 10 根+Ø89 mm 钻杆 36 根+Ø127 mm 钻杆 46 根,内管总成为取心管+打捞装置,如图 9 所示。



图 9 取心管和打捞装置

Fig.9 Core barrel and overshot device

下至 889 m 处,开泵循环,设置转速为 1 挡(43 r/min),泥浆泵量控制 8 L/s,钻压根据钻进速度调整,889~889.5 m,钻压保持在 20~30 kN,保证岩心能够顺利进入岩心管内,随后逐渐线性增大钻压,调整转速为 2 挡(63 r/min),但跳钻太严重,悬重在 30~49 t 之间来回跳动,跳动幅度过大,随后将转速调回 1 挡,保持最大钻压为 80 kN 钻进,牙轮取心钻头钻进 1.8 m 后,停止钻进,总用时为 1.5 h,平均钻进速度为 1.2 m/h,提钻查看岩心状况,取出的岩心如图 10 所示,取心总长度约为 1.6 m,岩心直径为 53 mm,岩心采取率为 88.9%。



图 10 第一次取心结果

Fig.10 Cores from the first coring run

2.4.2 第二回次和第三回次取心

2021 年 4 月 28~30 日完成了第二回次和第三回次的取心。由于第一次取心效果较好,为了能够增加一次取心长度,重新配做 3 m 双管单动取心管

一根,其余保持不变,按照设计要求重新连接钻杆钻具(如图 11 所示)。重新下钻,下至距离井底 2 m 处,开泵循环,设置转速为 1 挡,泥浆泵量控制 8 L/s,由于部分接头存在疲劳断裂的风险,钻压控制在 32 kN 以内,平均钻进速度为 0.5 m/h,最终进尺 3 m,起钻,其岩心情况如图 12 所示,取心总长度约为 2.2 m,岩心采取率为 73.3%。第三回次与第二回次参数基本相同,只是增大钻压至 48 kN 以内,其岩心结果如图 13 所示。取心总长度约为 2.6 m,岩心采取率为 86.7%,与龙河基地陆地试验效果吻合,当钻压保持 80 kN 以内时,增大钻压和转速既能提高钻进速度,也有助于岩心采取率的提高。



图 11 第二、三回次取心钻进牙轮取心钻头钻具组合

Fig.11 Coring drilling BHA from the Second and third coring run



图 12 第二回次取心结果

Fig.12 Cores from the second coring run



图 13 第三回次取心结果

Fig.13 Cores from the third coring run

2.5 效果分析

截至2021年5月底,此次试验共进行了3次取

心,3次取心效果均较好,岩心采取率能够达到70%~90%,具体取心参数如表3所示。

表3 3次取心对比

Table 3 Comparison between the three coring runs

名称	取心位置/m	岩性	转速/ (r·m ⁻¹)	泵量/ (L·s ⁻¹)	钻压/ kN	钻速/ (m·h ⁻¹)	取心钻进 长度/m	岩心长 度/m	岩心取 心率/%
第一次	891.06~892.86	高研磨性、高硬度花岗岩	43	8	8	1.2	1.8	1.6	88.90
第二次	986.07~989.07	高研磨性、高硬度花岗岩	43	8	32	0.5	3	2.2	73.30
第三次	1088.82~1091.82	高研磨性、高硬度花岗岩	43	8	48	0.5	3	2.6	86.70

通过此次实试验,对于该四牙轮取心钻头在硬岩钻进工艺参数有了进一步的了解,证明了其能够有效完成硬岩钻进取心,且钻进速率较高,当适当增大钻压后,取心效率与钻进速率都能有所提高。

3 结论及建议

(1)通过此次清水河地区实际施工,不断总结优化了牙轮取心钻头钻进工艺参数,在施工条件允许的情况下适当提高了钻压,钻进效率和岩心采取率均得到提高。

(2)由于多种原因,本次施工未能完全测试牙轮取心钻头在高转速、长取心筒内的取心能力及长时间工作的工作效率以及使用寿命,还需要多次实际施工来不断测试。

(3)该牙轮取心钻头在实际使用中存在岩心断裂问题,测量发现岩心长度与岩心导正条下端与牙掌最前端长度相同,因此还需要调整导正条结构,保证岩心完整性。

参考文献(References):

[1] 余之祥. 为开发蓝色国土,发展海洋经济做贡献——评介张耀光教授的《中国海洋经济地理学》[J]. 经济地理, 2016, 36(1):208.
SHE Zhixiang. Contribute to the exploitation of the blue land and the development of marine economy—A review on Professor Zhang Yaoguang's Marine Economic Geography of China[J]. Economic Geography, 2016, 36(1): 208.

[2] 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 Jiangliang, 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.

[3] 柴育成,周祖翼. 科学大洋钻探船的回顾与展望[J]. 地球科学

进展, 2003, 18(5):666-671.
CHAI Yucheng, ZHOU Zuyi. Scientific ocean drilling: Achievements and prospects [J]. Advances in Earth Science, 2003, 18(5):666-671.

[4] 阮海龙. 海洋地质调查压入活塞取样钻具研制[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
RUAN Hailong. Development of piston coring tool for marine geological survey [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.

[5] 李小洋,李宽,梁健,等. 海洋沉积地层多功能取样钻具研制[J]. 地质与勘探, 2020, 56(6):1266-1271.
LI Xiaoyang, LI Kuan, LIANG Jian, et al. Development of the multiple-funtion drill tool for core sampling in marine sedimentary strata [J]. Geology and Exploration, 2020, 56(6):1266-1271.

[6] 刘峰,耿瑞伦. 苏联科拉半岛地质超深井(CF-3)钻探取心简介[J]. 国外地质勘探技术, 1988(10):1-14.
LIU Feng, GENG Ruilun. Brief introduction to drilling and coring of the geological ultra deep borehole(CF-3) in Kola Peninsula, Soviet Union [J]. Foreign Geological Exploration Technology, 1988(10): 1-14.

[7] 杨甘生. KTB先导孔钻探技术概述[J]. 国外地质勘探技术, 1998(4):27-39.
YANG Gansheng. Overview of KTB pilot hole drilling technology [J]. Foreign Geological Exploration Technology, 1998(4): 27-39.

[8] 杨甘生. KTB主孔钻进技术[J]. 国外地质勘探技术, 1999(1):39-43.
YANG Gansheng. KTB main hole drilling technology [J]. Foreign Geological Exploration Technology, 1999(1):39-43.

[9] 区全邦. 216XQ6六牙轮硬地层取心钻头[J]. 石油钻采机械, 1985(5):17-19, 71-72.
OU Quanbang. 216XQ6 six cone hard formation coring bit [J]. Petroleum Drilling and Production Machinery, 1985(5):17-19, 71-72.

[10] 胡畔,李伟成,陈立,等. 国外海洋钻井绳索取心新技术[J]. 钻采工艺, 2009, 32(6):27-30, 141.
HU Pan, LI Weicheng, CHEN Li, et al. Overseas ocean drilling wireline coring tool [J]. Drilling & Production Technology,

- 2009, 32(6):27-30, 141.
- [11] 刘协鲁, 阮海龙, 陈云龙, 等. 国内常规海洋地质钻探取心技术进展[J]. 钻探工程, 2021, 48(3):113-117.
LIU Xielu, RUAN Hailong, CHEN Yunlong, et al. Progress in domestic conventional marine geological coring technology [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(3):113-117.
- [12] 梁涛, 陈云龙, 赵义. “地球号”钻探船钻井系统介绍[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会. 第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集. 北京:地质出版社, 2019: 348-356.
LIANG Tao, CHEN Yunlong, ZHAO Yi. Introduction to the drilling system of “Chikyū” drilling vessel [C]//The Mineral Exploration Engineering Committee of the Geological Society of China. Proceedings of the 20th National Annual Academic Exchange Conference on Mineral Exploration Engineering (Rock and Soil Drilling and Tunneling Engineering). Beijing: Geological Publishing House, 2019:348-356.
- [13] 张金昌, 刘秀美. 13000m 科学超深井钻探技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9):1-6.
ZHANG Jinchang, LIU Xiumei. 13000m drilling technology of super-depth scientific drilling-well [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9):1-6.
- [14] 王稳石, 张恒春, 闫家. 科学超深井硬岩取心关键技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(1):9-12.
WANG Wenshi, ZHANG Hengchun, YAN Jia. Key technology of coring in hard rocks for scientific ultra-deep drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(1):9-12.
- [15] 杨甘生, 王达. 科钻一井取心钻进技术研究[J]. 石油钻探技术, 2006(3):8-11.
YANG Gansheng, WANG Da. Research on coring technology in well CCSD-1 [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006(3): 8-11.
- [16] 杨迎新, 张文卫, 李斌等. 牙齿破岩效率的评价及牙齿优选探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2001(1):110-113.
YANG Yingxin, ZHANG Wenwei, LI Bin, et al. Effect evaluation on insert penetration to rock and optimization of insert shape [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001(1):110-113.
- [17] 任涵文, 贺红林, 宾鸿赞. 矿用牙轮钻头原理图生成的数学模型[J]. 华中理工大学学报, 1996(11):37-40.
REN Hanwen, HE Honglin, BIN hongzan. A mathematical model for schematic diagram generation in gear-type mine rock-bit [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1996(11):37-40.
- [18] 王兴志. 发动机连杆轴承异常磨损分析与研究[D]. 沈阳:东北大学, 2015.
WANG Xingzhi. Analysis and research on abnormal wear of engine connecting rod bearing [D]. Shenyang: Northeast University, 2015.
- [19] 余云云. 基于 ABAQUS 的剖分式滚滑轴承的接触分析[D]. 南昌:华东交通大学, 2018.
YU Yunyun. Contact analysis of split rolling-liding bearing based on ABAQUS [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2018.
- [20] 马红伟, 邓嵘. 牙轮钻头压力补偿系统的发展[J]. 石油矿场机械, 2007(7):22-25.
MA Hongwei, DENG Rong. Pressure compensation system development of cone bit [J]. Oil Field Equipment, 2007(7): 22-25.
- [21] 蒋金宝. 山前构造砾石层大尺寸钻头优化设计及现场试验[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(4):69-72.
JIANG Jinbao. Big size bit design & field test for gravel layer in piedmont structure [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(4):69-72.
- [22] 王兴忠, 陆青, 刘强, 等. 元坝地区珍珠冲地层新型三牙轮钻头的研制与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(2): 61-67.
WANG Xingzhong, LU Qing, LIU Qiang, et al. Development and application of a new type tri-cone drill bit in Zhenzhuchong Formation of Yuanba area [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(2):61-67.
- [23] 张帅. 基于 ABAQUS 的石油钻头破岩仿真实验系统开发[D]. 西安:西安石油大学, 2020.
ZHANG Shuai. Development of rock breaking simulation experiment system of petroleum bit based on ABAQUS [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2020.
- [24] 温挨树, 陈军. 内蒙古自治区地热水开发利用现状及前景研究[J]. 西部资源, 2015(1):81-83.
WEN Jieshu, CHEN Jun. Study on the current situation and prospect of geothermal water development and utilization in Inner Mongolia autonomous region [J]. Western Resources, 2015(1):81-83.
- [25] 樊锐, 王柳, 苏刚, 等. 二连油田乌兰花区块钻井提速配套技术及应用[J]. 石化技术, 2020, 27(6):361, 363.
FAN Rui, WANG Liu, SU Gang, et al. Matching technology and application of drilling speed increase in Wulanhua block of Erlian Oilfield [J]. Petrochemical Industry Technology, 2020, 27(6):361, 363.

(编辑 李艺)