

适用于海底钻机的保压绳索取心钻具设计

彭奋飞^{1,2}, 王佳亮^{*1,2}, 万步炎^{1,2}, 黄筱军^{1,2}, 唐永辉^{1,2}, 彭德平^{1,2}

(1. 湖南科技大学海洋矿产资源探采装备与安全技术国家地方联合工程实验室, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学机电工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:以维持保压钻具内天然气水合物稳定性为研究目的,针对现有大口径保压钻具存在钻孔直径大、岩心样品直径小、钻具结构复杂、钻具质量重从而不适用于海底钻机使用工况要求的实际问题,对保压钻具的结构重新进行设计并进行了室内保压试验。结果表明:该小口径薄壁保压钻具的尺寸合理、结构紧凑,能够满足海底钻机使用工况要求;室内保压试验表明当压力维持在10 MPa以下的压力值时,6 h以内压力下降15%左右;而当压力维持在10~30 MPa之间的压力值时,6 h以内压力下降10%。该保压钻具在上述压力区间内使用满足设计和使用要求。

关键词:海洋勘探;海底钻机;保压取心;绳索取心钻具;结构设计;保压试验

中图分类号:P634.4⁺3 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)04-0097-07

Design of the pressure-coring tool for underwater drilling rig

PENG Fenfei^{1,2}, WANG Jialiang^{*1,2}, WAN Buyan^{1,2}, HUANG Xiaojun^{1,2}, TANG Yonghui^{1,2}, PENG Deping^{1,2}

(1. Hunan University of Science and Technology, National Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral

Resources Exploration Equipment and Safety Technology, Xiangtan Hunan 411201, China;

2. Hunan University of Science and Technology, School of Mechanical Engineering, Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: With maintaining gas hydrate stability in the pressure coring tool as research purposes, and in view of the problems with the existing large diameter pressure coring system, such as small core diameter at large drilling diameter, complex drilling tool structure, heavy weight, which makes it not applicable to the actual working condition of the underwater drilling rig, the pressure coring tool was redesigned structurally and indoor pressure tests were carried out. The results showed that the small diameter thin wall pressure-coring tool is reasonable in size and compact in structure, which can meet the requirements of the underwater drilling rig. Laboratory tests showed that when the pressure was maintained below 10MPa, the pressure decreased by 15% within 6 hours; when the pressure was maintained between 10MPa and 30MPa, the pressure dropped by 10% within 6 hours, and the pressure-coring tool can meet the design and service requirements when used within the above pressure ranges.

Key words: offshore exploration; underwater drilling rig; pressure coring; wireline core drilling tool; structure design; pressure test

收稿日期:2020-07-24; 修回日期:2021-03-11 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.04.013

基金项目:国家重点研发计划项目“海底大孔深保压取心钻机系统研制”(编号:2017YFC0307501);国家自然科学基金项目“硬脆性磨粒对金刚石钻头在硬岩钻进中的性能影响机制”(编号:41702390);湖南创新型省份建设专项“深地地质探测关键技术研究及钻探装备研制”(编号:2019GK1012)

作者简介:彭奋飞,男,汉族,1993年生,硕士研究生在读,主要从事海洋勘探相关的研究工作,湖南省湘潭市雨湖区59号, fenfeipeng@163.com。

通信作者:王佳亮,男,汉族,1986年生,副教授,硕士生导师,博士,主要从事海洋勘探、金刚石碎岩工具方面的教学与研究工作,湖南省湘潭市雨湖区59号, jialiangwang2019@163.com。

引用格式:彭奋飞,王佳亮,万步炎,等.适用于海底钻机的保压绳索取心钻具设计[J].钻探工程,2021,48(4):97-103.

PENG Fenfei, WANG Jialiang, WAN Buyan, et al. Design of the pressure-coring tool for underwater drilling rig[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(4):97-103.

0 引言

深海天然气水合物开发与利用已经成为世界各国未来资源战略的一个新热点^[1-2]。钻探取心是获取天然气水合物样品的最直接的方法。由于天然气水合物形成和存在是在低温高压环境下,国内外主要采用保压取样技术开展天然气水合物的取样工作^[3]。国内外相继开展了针对天然气水合物保真取样的研究工作,其中围绕传统海洋大型钻探船和陆域岩心钻机所展开的保压取心研究较为系统和丰富^[4-5]。目前在进行保压方案设计时,通常采用增加钻具壁厚、设置保温夹层、内部轴向布置压力补偿装置、安装大尺寸球阀等措施来获得钻具较为宽泛的轴向和径向空间设计尺寸^[6]。国外具有代表性的产品有在国际深海钻探计划(DSDP)采用的PCB保压取心器、国际大洋钻探计划(ODP)采用的PCS保压取心器等^[7-8]。国内有中石化集团胜利石油管理局钻井工艺研究所研制的绳索旋转式保压钻具、钻柱式旋转保压钻具,北京探矿工程研究所研制的TKP-1型保温保压绳索取样器,中国地质大学(北京)研制的绳索取心保温保压取样器,中国石油大学研制的钻探取样保真器等^[9-10]。以上类型钻具的共同特点是能够采用主动保压方案,其钻具上部可以设置不同形式的压力补偿装置,下部通过球阀或板阀实现密封,并可根据要求设置内壁保温夹层从而实现被动保温。但是,为了使钻具内有足够的径向空间安装球阀或板阀,以上类型钻具的尺寸均较大且钻获的岩心直径偏小。在陆域天然气水合物保真取样研究方面,吉林大学的研究团队开展了大量针对孔底冷冻绳索取心技术研究工作,并针对冰阀式绳索取心保压技术展开了深入的研究^[11-12]。以上研究的共性特点是钻具的底部均不设置机械式的球阀。其思路是通过样品管进行整体制冷抑制水合物分解或者下端部局部制冷形成

冰堵头的方法实现对水合物的保真取样。由于无需设置球阀,钻具的尺寸有所减小,其采用 $\varnothing 127$ mm规格的钻具能够获得直径50 mm的岩心。但是钻具的冷源存储腔往往需要占据很长的轴向空间以确保能够携带足够数量的冷源从而实现快速制冷,因此以上类型钻具的总长较长。

目前现有的保压钻具主要是针对海面钻探船以及陆域天然气保压取样形式,配合位于母船甲板上的钻机使用^[13]。对于海底钻机而言,由于每次作业所需的全部钻具是随海底钻机一同下放至海底,当每回次钻进结束后从孔底打捞的内管首先存储于海底钻机本体上的钻具库内,待整个钻孔全部结束后再随钻机一起提升至母船甲板。因此,海底钻机对所携带的总钻具数量有着严格的质量和空间尺寸要求,现有针对钻探船的保压取心钻具均存在钻具口径大、岩心样品直径小、钻具质量重、钻具结构复杂等问题^[14]。因此研制适用于海底钻机的小口径薄壁保压钻具显得尤为迫切。本文以国家重点研发计划项目“海底大孔深保压取心钻机系统研制”等为依托,综合考虑“海牛号”220 m保压海底钻机的工况要求,设计了针对海底钻机的小口径薄壁保压钻具并对其保压性能进行了室内试验。

1 保压钻具总体方案设计

本次设计的小口径薄壁保压绳索取心钻具由外管总成和内管总成2部分构成。其中外管总成的结构与常规钻具基本相同;内管总成主要由弹卡机构、悬挂机构、单动机构、拨叉单向阀启闭机构、保压单向阀机构、岩心卡断机构和下端部保压帽组成(见图1)。回次钻进开始前,机械手抓取内管总成移至钻机本体上的保压帽拧卸装置处,借助拧卸装置将保压帽与内管总成分离,利用钻机上的绳索绞车配合打捞机构将内管总成下放至孔底外管总成中的预定位置,进行钻进作业。

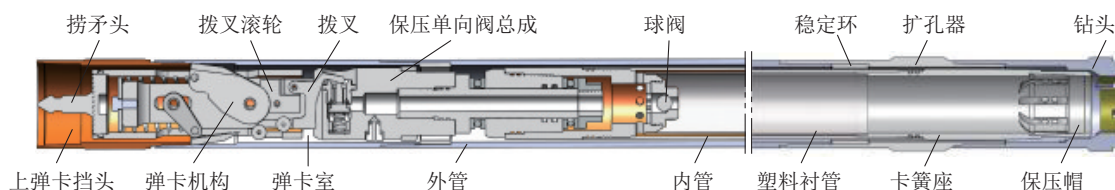


图1 Ø75 mm 保压绳索取心钻具总成

Fig.1 Ø75mm wireline pressure-coring assembly

1.1 外管总成

图2所示外管总成由钻具弹卡挡头($\varnothing 75$ mm)、弹卡室、外管、座环、稳定环、扩孔器以及阶梯金刚石钻头($\varnothing 75$ mm)等组成。为有效增加关键零部件的耐磨损性以及减轻海水对钻具的腐蚀,外管总成中的弹卡室及弹卡挡头部分均进行了镀铬处理。考虑到海底复杂的地质条件以及钻杆连接的尺寸精度,因此外管采用具有较高强度和精密尺寸的XJY850地质管材^[15]。本次设计在常规座环结构形式的基础上对其进行优化改进,包括常规座环外圈均倒角 45° ,内圈边缘处均车台阶再倒角 45° 。经改进后的座环结构能够有效避免内管总成投放不到

位以及钻进结束后在拔断岩心的过程中,由于冲击力较大而导致悬挂环与座环发生卡死现象导致打捞失败的风险。稳定环主要用于内管导向,使内外管保持同轴,便于岩心进入卡簧座和内管。扩孔器主要起扩大孔径、修整孔壁的作用,避免钻进过程中产生钻孔缩径、钻进冲洗液压力过高、卡钻烧钻等钻进事故发生的风险^[16]。本次设计选用的是金刚石扩孔器,其主要技术参数为:金刚石粒度50/60目,外径75.4 mm。阶梯型金刚石钻头采用 $\varnothing 75/45.5$ mm,胎体硬度HRC25,金刚石浓度55%,金刚石粒度30/35目,切削齿数6个。

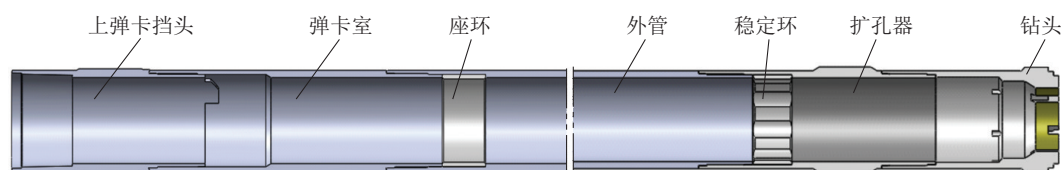


图2 $\varnothing 75$ mm 保压钻具外管总成

Fig.2 Outer tube of $\varnothing 75$ mm pressure coring tool

1.2 内管总成

图3是75 mm口径的保压绳索取心钻具内管总成示意。该钻具内管总成由弹卡机构、拨叉单向阀启闭机构、保压单向阀机构、岩心卡取机构、底部保压帽组成。弹卡机构置于收卡筒中且在收卡筒中下部设有拨叉单向阀启闭机构,弹卡机构的下端与保压单向阀机构的上端连接;保压单向阀机构的下端与内管的上端连接;保压单向阀机构的下部设有

回水球阀;岩心衬管设置在内管中同时为了满足取心直径 ≤ 45 mm的要求,岩心衬管的外径为48.5 mm,壁厚为2 mm,材质为PP透明塑料;内管的下端与卡簧座用螺纹连接,卡簧座内设带有铜片的卡簧以满足既能卡断岩心又能防止软泥岩心散失的作用;卡簧座下部与保压帽采用螺纹连接,保压帽内设有Y形密封圈,目的是实现内管总成下端的密封。

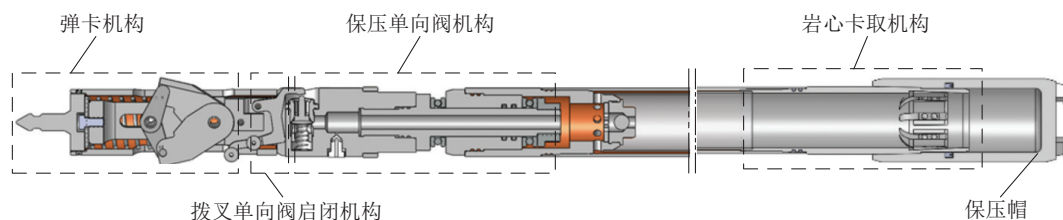


图3 $\varnothing 75$ mm 保压绳索取心钻具内管总成

Fig.3 Inner tube of $\varnothing 75$ mm pressure-coring tool

1.2.1 内管总成上端部保压密封设计

考虑到海底钻机的整机高度对钻具总长的严格限制,为了能够尽可能地节省钻具的轴向空间尺寸以期能够在有限的长度范围内增加有效获取岩心的长度。因此,本次设计采用被动保压方案,钻具的上端部不设置沿轴向布置的压力补偿装置以

提高钻具的有效取心长度。本次设计采用拨叉式启闭机构和保压单向阀方案实现在钻进结束后对内管总成上端部的密封。其原理是利用内管总成中的弹卡机构在正常钻进状态时受外管总成中弹卡室的径向约束,迫使收卡筒沿轴向上移动,从而带动与收卡筒联动的拨叉发生转动,实现单向阀的

正常开启动作。当回次进尺结束后,内管总成提离孔底,此时弹卡室对弹卡机构的径向约束结束,在弹簧力的作用下收卡筒沿轴向下移,使得拨叉复位完成上端部的密封动作(如图4所示)。

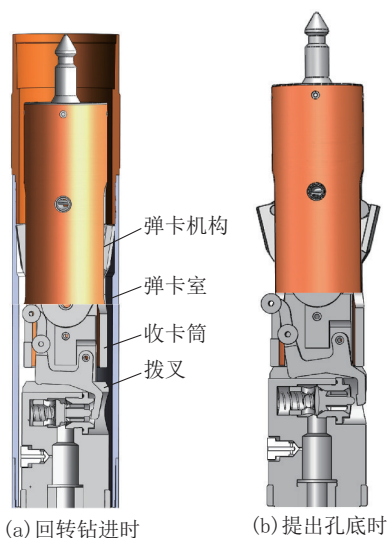


图4 内管总成上端部保压密封动作示意

Fig.4 Working schematic of the upper end of the inner tube for pressure holding

1.2.2 内管总成下端部保压密封设计

通常陆域保压钻具的下端部密封方案是采用内置式球阀或板阀进行密封操作,其在密封时存在球阀启闭可靠性差的风险。此外由于球阀占用钻具径向的空间过大,导致钻具的尺寸偏大不满足海底钻机对钻具重力和口径限制的要求。针对上述问题,本次设计充分发挥海底钻机上的机械手能够对钻具进行辅助操作的优势,采用内置有Y形密封圈的保压帽并在钻机本体上保压帽拧卸装置的配合下完成钻具下端部的密封操作(参见图5)。采用分体式保压帽结构并在机械手和拧卸装置的配合下完成密封动作的优势在于能够有效地减小钻具直径以便在较小钻孔口径的前提下获取较大直径的岩心样品,同时螺纹接连形式能够提高保压密封的可靠性与安全性。

1.3 保压取心钻具工作过程

保压取心钻具首先存储于钻机本体的旋转钻具库内,并由钻机直接携带至海底,钻具的接卸均在海底由机械手完成。如图6所示,钻进开始前,机械手抓取内管总成移至钻机本体上的下端部密封

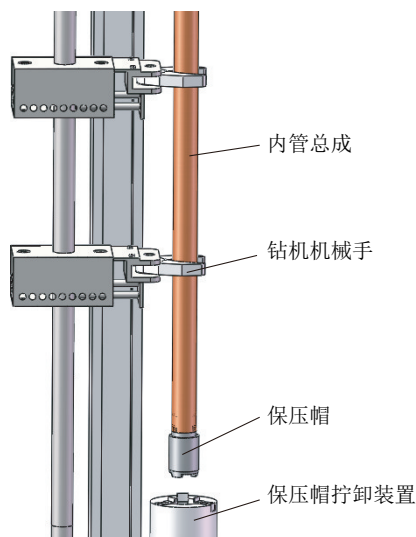


图5 内管总成下端部保压密封操作示意

Fig.5 Operating schematic of the lower end of the inner tube for pressure holding

盖拧卸装置处(图6b),借助拧卸装置将下端部保压帽与内管总成分离,与内管总成分离后的下端部保压帽暂存在拧卸装置内,同时机械手将去除下端部保压帽的内管总成移至孔口,利用钻机上的绳索绞车配合打捞机构将内管总成下放至孔底外管总成中的预定位置,进行钻进作业。参见图6(c),当在工作状态时,内管总成中的弹卡板受到外管总成中弹卡室的径向约束(1),使得收卡筒沿轴向上移一段距离(2),此时收卡筒对拨叉中的拨叉滚轮起限位作用(3),迫使拨叉绕圆柱销发生转动(4),触发拨叉动作,将单向阀的阀芯顶开(5),确保在钻进过程中单向阀始终处于开启状态,形成排水通路。当钻进结束后,利用打捞机构将内管总成快速提至孔口,弹卡室对弹卡板的径向约束解除,收卡筒沿轴向下移复位,收卡筒对拨叉滚轮的限位解除,拨叉复位,单向阀关闭,实现内管总成上端部的密封。通过机械手将内管总成移至钻机本体上的下端部保压帽拧卸处,拧卸装置将暂存在其内部的下端部保压帽与卡簧座连接,配合下端部保压帽中的密封圈,实现对内管总成下端的密封。至此,钻具内管总成上下端部均处于密封状态,其内部存储的天然水合物样品也处于保压密封状态。借助机械手将存有样品的内管总成存储于钻机上的钻具库内并抓取新的内管进行下一回次作业,待钻孔作业结束后再将全部内管随海底钻机一同提升至母船。

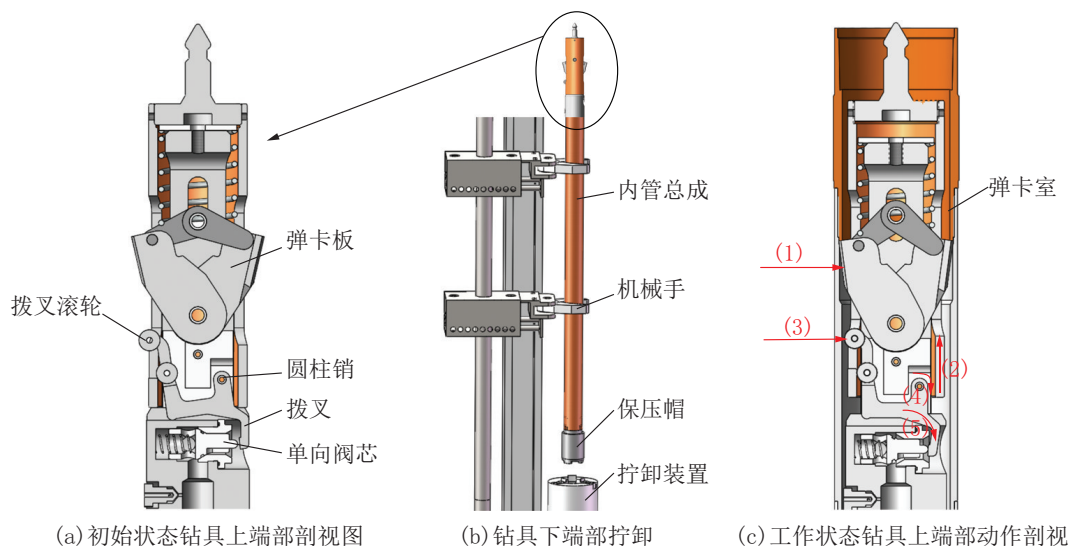


图6 保压取心钻具工作过程

Fig.6 Working process of the pressure-coring tool

当海底钻机在粉质粘土、泥质粉砂、粉细砂等非岩性沉积物层取样时可以采用压入式抽吸取心模式,配合钻机本体上的抽吸活塞缸,在取心过程中使内管总成中形成活塞式负压,提高岩心采取率;在硬质岩化的沉积层取样时采用回转钻进取心模式,冲洗液经内外管之间的环状间隙流经钻头的水口到达孔底,对钻头进行冷却并携带孔底岩粉沿钻杆和孔壁间的环状间隙上返至孔口。

2 保压取心钻具室内保压测试

钻具样机试制后,进行了室内保压测试(见图7)。综合考虑海底天然气水合物赋存水深和海底钻机最大作业水深的要求,保压取心钻具最大保压能力应能达到25 MPa。第一步向内管总成中注满水,并拧上保压帽从室外借助手摇加压泵给钻具内部进行加压,以5 MPa为间隔并观察压力表的数值变化,检查钻具的密封连接处和保压帽处是否存在漏水现象。按照设计要求需要将最大压力加压到30 MPa,检查钻具的稳压性能和装配质量。

第二步将在外部检查合格的保压钻具内管总成放入深水压力仓中进一步测试钻具的保压性能。深水压力仓测试能够模拟从海底回收的过程中钻具内外压差不断变化的过程,通过控制深水压力仓的卸压速度能够模拟钻机回收的速度,其保压性能的测试结果更加接近于实际工况。为了提高测试



(a) 手压泵打压测试



(b) 深水压力仓打压测试

图7 保压密封试验

Fig.7 Pressure holding test

结果精度,采用压力传感器测量钻具内的压力值,首先利用万用表测量初始电压值,其初始读数为0.080 V,然后对待测压力值做原始数值标定,最后将压力仓均匀加压至待测压力值,并保压15 min。

结合海底钻机的实际回收作业流程,2000 m海深的回收过程通常需要40 min,因此,压力试验仓的卸压速度也同样设定为40 min卸至0,卸压完毕后利用万用表连接压力传感器进行压力测试。测试结果如表1所示。

表1 室内保压试验
Table 1 Laboratory pressure-holding test

加压力值/ MPa	试验后万用 表读数/V	试验后压 力/MPa	6 h后压降/ MPa	失压 率/%
5	0.54	5	0.8	16
8	0.82	8	1.2	15
10	0.93	10	1	10
15	1.51	15	1.5	10
20	2.02	20	2	10
25	2.52	25	2.5	10
30	3.11	30	3	10

由上述试验结果可以看出,钻具在低压(5~8 MPa)状态6 h后的压力损失值为15%左右,在高压状态(10~30 MPa)的压力损失率为10%。低压下压力损失率大的主要原因是对卡簧座和保压帽的丝扣加工经验不足,间隙较大,保压帽中密封圈与卡簧座密封面的配合间隙不合适导致密封圈在低压下的预紧力略小所致,后期密封圈槽的结构设计值得到了进一步优化。综上所述,本次设计的小口径薄壁保压取心钻具能够在海底钻机的配合操作下实现保压功能,满足所设计的相关要求。

3 结语

综上所述,本次设计的适用于海底钻机的小口径薄壁保压取心钻具结构设计方案能够满足海底钻机的使用工况与使用要求。本次设计的保压方案上端部密封设计采用机械联动方式提高了密封的可靠性,下端部密封充分利用了海底钻机上的拧卸装置和机械手的配合优势有效减小了钻具的直径。通过室内保压试验,证明本次设计的小口径薄壁保压取心钻具能够实现所设计的保压功能。该钻具方案为海底钻机勘探钻探取样提供了一种新的工具,尤其是针对天然气水合物,能够有效改善钻探取心的样品质量,从而进一步提高海底天然气水合物储量评价的准确性。

参考文献(References):

- [1] 李小洋,王汉宝,张永勤,等.海洋天然气水合物探测及取样钻具研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):47-51.
LI Xiaoyang, WANG Hanbao, ZHANG Yongqin, et al. Development of marine gas-hydrate detection and drilling sampler[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(10):47-51.
- [2] 许俊良,任红.天然气水合物钻探取样技术现状与研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(11):4-9.
XU Junliang, REN Hong. Status of gas hydrate sampling technology and the research[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(11):4-9.
- [3] Guo Wei, Zhang Pengyu, Yang Xiang, et al. Development and application of hole-bottom freezing drilling tool for gas-hydrate-bearing sediment sampling[J]. Ocean Engineering, 2020(203): 1-12.
- [4] 左汝强,李艺.美国阿拉斯加北坡永冻带天然气水合物研究和成功试采[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(10):1-17.
ZUO Ruqiang, LI Yi. The research and successful production test for NGH in Alaska North Slope, USA[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(10): 1-17.
- [5] 李小洋,张永勤,王汉宝,等.煤层气调查评价钻探保压取心钻具设计与试制[J].地质与勘探,2019,55(4):1045-1050.
LI Xiaoyang, ZHANG Yongqin, WANG Hanbao, et al. Design and trial-manufacture of the pressure-holding core drilling tool for evaluation of coal-seam[J]. Geology and Exploration, 2019,55(4):1045-1050.
- [6] 许俊良,薄万顺,朱杰然.天然气水合物钻探取心关键技术研究进展[J].石油钻探技术,2008,36(5):32-36.
XU Junliang, BO Wanshun, ZHU Jieran. Development of gas hydrate coring technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008,36(5):32-36.
- [7] 张永勤,祝有海.祁连山永久冻土带天然气水合物钻探工艺与应用[J].地质通报,2011,30(12):1904-1909.
ZHANG Yongqin, ZHU Youhai. Research and application of the natural gas hydrate drilling technique in Qilian Mountain permafrost[J]. Geological Bulletin of China, 2011,30(12):1904-1909.
- [8] 付强,王国荣,周守为,等.海洋天然气水合物开采技术与装备发展研究[J].中国工程科学,2020,22(6):32-39.
FU Qiang, WANG Guorong, ZHOU Shouwei, et al. Development of marine natural gas hydrate mining technology and equipment[J]. Strategic Study of CAE, 2020,22(6):32-39.
- [9] 李鑫淼,李宽,孙建华,等.国内外绳索取心钻具研发应用概况及特深孔钻进问题分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):15-23,39.
LI Xinmiao, LI Kuan, SUN Jianhua, et al. Development and application of wireline coring tool and diagnosis of ultra-deep

- hole drilling problems [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020, 47(4):15-23, 39.
- [10] 卢予北, 吴烨, 陈莹. 绳索取心工艺在大口径深部钻探中的应用研究[J]. *地质与勘探*, 2012, 48(6):1221-1228.
LU Yubei, WU Ye, CHEN Ying. Application of the wire-line coring technique to large-diameter deep drilling [J]. *Geology and Exploration*, 2012, 48(6):1221-1228.
- [11] 郭威, 孙友宏, 陈晨, 等. FPCS型天然气水合物孔底冷冻保压取样器的设计[J]. *机械设计与制造*, 2011(1):24-26.
GUO Wei, SUN Youhong, CHEN Chen, et al. The design of the FPCS sample for gas hydrates by hole bottom freezing and pressure-tight [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2011(1):24-26.
- [12] 孙友宏, 刘大军, 郭威, 等. 天然气水合物孔底冷冻取样技术及冷冻方式[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2013, 34(11):1460-1464.
SUN Youhong, LIU Dajun, GUO Wei, et al. The research on a sampling technology for gas hydrates by borehole bottom freezing and its freezing [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2013, 34(11):1460-1464.
- [13] 宋其新, 廖道钊, 王荣耀, 等. 海底保压钻具密封结构的设计与分析[J]. *矿业研究与开发*, 2019, 39(10):103-107.
SONG Qixin, LIAO Xiaozhao, WANG Rongyao, et al. Design and analysis of sealing structure for seabed pressure-retaining drilling tool [J]. *Mining Research and Development*, 2019, 39(10):103-107.
- [14] 葛云峰, 杨军. 天然气水合物取样器球阀结构的设计和气囊的应用[J]. *钻井液与完井液*, 2008(5):11-13, 83-84.
GE Yunfeng, YANG Jun. Natural gas hydrate sampler: design of the ball valve structure and the application of the gas bag [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2008(5):11-13, 83-84.
- [15] 况雪军, 孙建华. XJY850高强度精密地质管材的研制[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2009, 36(6):28-30.
KUANG Xuejun, SUN Jianhua. Development of XJY850 sophisticated high-strength geological pipe material [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2009, 36(6):28-30.
- [16] 王佳亮, 张绍和. 硬质磨粒对孕镶金刚石钻头胎体磨损性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(9):1872-1878.
WANG Jialiang, ZHANG Shaohe. Effects of hard abrasive particles on matrix wear resistance of diamond impregnated bit [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(9):1872-1878.

(编辑 荐华)