

◀ 专家视点 ▶

doi:10.11911/syztjs.201705001

# 极地冷海钻井技术挑战及关键技术

杨 进<sup>1</sup>, 路保平<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(北京)海洋工程研究院,北京 102249;2. 中国石化石油工程技术研究院,北京 100101)

**摘要:** 北极冷海地区油气资源丰富,是目前国际石油公司关注的热点,了解极地冷海钻井技术挑战和关键技术现状,对推进极地冷海钻井技术进步、实现极地冷海油气资源的高效开发具有重要意义。为此,通过大量文献调研和实地考察,分析了国内外极地冷海钻井装备及关键技术的现状和主要研究进展,得到了以下认识:恶劣的作业环境、长距离的后勤保障和苛刻的环保要求,是极地冷海油气勘探开发面临的首要难题;坐底式平台、人工岛、抗冰自升式平台和浮式平台等是目前极地冷海钻井作业采用的关键装备,低温钻机、全封闭抗冰平台及耐低温新型材料等是极地冷海钻井亟待突破的关键装备及材料。调研分析认为:冻土层钻井技术、低温钻井液和固井技术、万米大位移井钻井技术、极地灾害风险评价及控制技术和钻井废弃物环保排放技术是未来极地冷海钻井技术的主要攻关方向,是实现极地冷海油气资源高效开发的关键。

**关键词:** 极地;冷海;低温;冻土层;钻井装备;海上钻井

中图分类号:TE521 文献标志码:A 文章编号:1001-0890(2017)05-0001-07

## The Challenges and Key Technologies of Drilling in the Cold Water Area of the Arctic

YANG Jin<sup>1</sup>, LU Baoping<sup>2</sup>

(1. Institute of Ocean Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

**Abstract:** The cold water area of the Arctic is rich in oil and gas resources, which has been the focus of international oil petroleum companies presently. Understanding the challenges and key technologies of drilling in this area is of great importance for promoting the technological breakthroughs and making high efficient development of oil and gas resources. Through a large number of literature research and field investigation, Arctic cold water drilling equipment and key technologies as well as main research progress have been analyzed in domestic waters and abroad, and have arrived at the following conclusions: the primary challenges for oil and gas exploration and development in cold water area of the Arctic include harsh operating environment, long distance logistic support, stringent environmental requirements. The key equipment for drilling in the area includes bottom-supported platform, artificial island, ice resistant jack-up platforms and floating drilling rigs. Meanwhile, low-temperature drilling rigs, fully enclosed ice resistant platforms and new low temperature resistant materials are the key drilling equipment and materials urgently require a technical breakthrough urgently in the near future. The investigation results indicate that the main research directions for cold water area of the Arctic drilling should include permafrost drilling technology, low temperature drilling fluid and cementing technology, the extended reach drilling with displacement more than ten thousands of meters, the assessment and control of the disaster or risk, drilling waste emission, environmental protection, etc, which are the key technologies for the high efficiency development of oil and gas resources in cold water area of the Arctic.

**Key words:** Arctic; cold sea; low temperature; permafrost layer; drilling equipment; offshore drilling

北极地区海洋油气资源开发潜力巨大,据统计,目前北极地区已探明的常规油气储量超过  $400 \times 10^8 \text{ m}^3$  (2 400 亿桶)<sup>[1-3]</sup>, 主要分布于美国阿拉斯加和加拿大西北部的波弗特海(Beaufort Sea),俄罗斯的巴伦支海(Barents Sea)、萨哈林岛(Sakhalin Island)及格陵兰(Greenland)等地区,其中超过一半的油气资源分布于水深小于 100 m 的海域<sup>[4-5]</sup>。由于巨大的油气资源和未来能源战略的发展需求,极地冷海油气资源已经成为各大石油公司关注的热

收稿日期:2017-08-28。

**作者简介:** 杨进(1966—),男,河南项城人,1989 年毕业于石油大学(华东)钻井工程专业,1996 年获石油大学(北京)油气井工程专业硕士学位,2004 年获中国矿业大学(北京)资源勘查工程专业博士学位,教授,博士生导师,主要从事海洋工程、海上钻井完井技术的教学和研究工作。E-mail:yjin@cup.edu.cn。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目“极地冷海钻井关键技术研究”(编号:2016YFSF010327)、国家自然科学基金项目“海洋深水浅层钻井关键技术基础理论研究”(编号:51434009)、国家自然科学创新研究群体项目“复杂油气井钻井与完井基础研究”(编号:51221003)、国家自然科学基金项目“深水油气井导管全寿命周期承载力演化机理研究”(编号:51774301)联合资助。

点。中国石化在俄罗斯萨哈林油气合作开发项目的基础上<sup>[6]</sup>,与俄罗斯石油公司签订了《共同开发鲁斯科耶油气田和尤鲁勃切诺-托霍姆油气田合作框架协议》,共同开发极地冷海区域的油气资源<sup>[7]</sup>。目前,只有俄罗斯、美国和挪威等少数国家开展过极地冷海钻井作业,其中俄罗斯是开展冷海钻井技术研究与作业较多的国家,已在北极圈海上钻探了 100 余口井,在低温钻井液、固井和工具等方面取得了一定进展,但技术成熟度还不够<sup>[8]</sup>。我国在极地钻井装备及工具的研制中取得了一定的突破,研制了能够适应环境温度 -50 ℃、钻井深度 5 000 m 的低温轨道钻机,并成功应用于亚北极萨哈林冷海区域 5 口探井的钻井作业中<sup>[9]</sup>。与国外冷海钻井技术相比,国内冷海钻井关键技术研究仍处于起步阶段。为此,笔者通过大量的文献调研和实地考察,在总结极地冷海钻井面临的主要挑战的基础上,分析了目前极地冷海钻井装备和关键技术研究现状,并对今后的技术发展趋势进行了展望。

## 1 极地冷海钻井主要挑战

从国内外极地冷海钻井情况来看,极地冷海地区钻井作业面临的主要挑战是极度严寒、浅部的冻土层和恶劣的海洋环境,同时后勤保障和环保要求也是制约极地冷海钻井作业的关键因素。

### 1.1 作业环境恶劣

极度严寒、暴风雪及常年存在的海冰使极地冷海钻井作业的环境极为恶劣。北极地区海面的年平均气温为 -20~ -50 ℃,如此低的温度不仅威胁着作业人员的人身安全,也增加了钻井作业的难度,并对材料和燃料的耐低温性能也提出了极高的要求。北极海面上漂浮着大量的浮冰和冰山,且暴风雪频发,这就要求钻井平台、钻井船等钻井装备及隔水管、水下井口等水下设备具有很高的强度和稳定性。在冬季北极海面基本被完全冰封,无法进行钻井作业,即使在夏季也需要破冰船辅助破冰,极大地增加了作业成本,所以极地冷海地区往往使用非常坚固的坐底式平台来进行钻井作业。据统计,北极地区年平均作业周期不超过 6 个月,其中巴伦支海和波弗特海的年平均作业周期只有 60~120 d,严酷的自然环境和极短的作业周期对钻井技术、装备和井控设施的可靠性提出了更高的要求。例如,位于俄罗斯伯朝拉海(Pechora Sea)的 Prirazlomnoye 钻井平

台,当环境温度低于 -20 ℃ 时就要停止钻井作业<sup>[10]</sup>,因为海底泥线处井筒温度低至 0 ℃ 以下,而井底储层的温度却高达 150 ℃,在低温和大温变的条件下,钻井管柱容易发生脆性破坏,钻井液和水泥浆的性能也面临极大的挑战,因此研究低温和大温变条件对钻井管柱力学特性、井筒流体的流变性和稳定性的影响十分重要。

### 1.2 浅部地层复杂

北冰洋沿岸和海底的浅部地层广泛分布着冻土层和天然气水合物,受海水含盐量等因素的影响,北冰洋许多海域海底的温度在 0 ℃ 以下,海底冻土层的厚度可达 200 m<sup>[11]</sup>。在钻井作业过程中钻头的切削摩擦,钻井液与周围冻土、天然气水合物地层之间发生热交换,均可导致冻土的融化和天然气水合物的分解,造成井壁失稳或井口下沉。俄罗斯西西伯利亚 Zapolrnoye 气田一些井在钻井过程中由于冻土层融化而导致井口出现下沉,最大下沉深度超 3 m<sup>[12]</sup>。因此浅部地层分布的冻土层和天然气水合物是极地冷海钻井作业安全的重要挑战。

### 1.3 后勤保障艰难

极地冷海地区人迹罕至,基础设施薄弱,而基地距离远,航线长,大型装备运输困难。由于北极地区没有大型机场,所有物资的运输主要依靠轮船。北极圈内唯一的不冻港——摩尔曼斯克是北冰洋沿岸的最大城市,深入北极圈超过 300 km,是俄罗斯天然气公司的技术服务基地和石油专用码头,所有俄罗斯北极油气区块的设备维修和运输均在该基地完成<sup>[13]</sup>。摩尔曼斯克距离俄罗斯巴伦支海油田仍然超过 1 000 km,补给船或破冰船往返一次的时间超过 14 d,在冬季或者海况恶劣的时候无法进行运输,因此北极地区的后勤保障难度远高于其他海洋,极易因后勤保障问题导致钻井周期延长,甚至钻井作业中断。因此,极地冷海钻井作业必须高度重视后勤保障,需要有可靠的补给基地作为依托,以保证钻井作业的顺利完成。

### 1.4 环保要求苛刻

极地冷海地区的生态环境非常脆弱,钻井过程中如果出现原油泄露、工作液泄露及冰层与表层冻土融化导致下部地层天然气水合物分解泄露,均会对生态环境造成极大的破坏。当地法律法规对极地钻井作业的环保要求极为苛刻,钻井作业过程中必

须达到零排放的环保要求<sup>[14]</sup>,这也导致了钻井施工难度的增大和作业成本的增加。因此,钻井液无害化处理和钻井液回收技术是解决钻井液对极地海洋环境污染的关键。

## 2 极地冷海钻井装备现状

### 2.1 开发井钻井装备

考虑极地冷海地区恶劣的作业环境和高昂的作业成本,主要采用坐底式平台或人工岛模式来进行油气开发。

#### 2.1.1 坐底式平台

在水深 30 m 以浅的海域,坐底式平台是一种既安全又经济的油气开发模式,其中最具代表性的是俄罗斯 2013 年投入使用的 Prirazlomnoye 坐底式平台(见图 1)<sup>[15]</sup>。



图 1 Prirazlomnoye 坐底式平台

Fig. 1 Prirazlomnoye bottom-supported platform

Prirazlomnoye 坐底式平台所在的伯朝拉海油田于 1989 年勘探发现,可采储量约  $7 \times 10^7$  t。该平台下部钢制混凝土模块由北德文斯克造船厂建造,上部模块由挪威哈顿船厂建造,其他模块均在俄罗斯建造,总用钢量约  $5 \times 10^7$  t,经历了 10 多年的设计与建造,于 2013 年正式投入使用,所在海域水深 19~20 m、冬季最低温度达到  $-50^{\circ}\text{C}$ 、冰期约 230 d(11 月到次年 5 月)、冰厚达 1.70 m、风力最高为 40 m/s<sup>[16]</sup>。

Prirazlomnoye 平台集钻井完井、油气处理和储卸油为一体,包括井口区、油气处理区、储油区、卸油区和生活区;平台自带封闭式模块钻机,可以实现钻井完井、修井及后期调整井钻井作业,设有 40 个井槽,其中采油井 19 口,注水井 16 口,水源井 1 口,4 个预留空井槽;井口区分为 4 个区域,每 10 口井为一个区

域,全部采用保温装置,日产原油约  $20\ 748\text{ m}^3$ <sup>[17]</sup>。

该平台采用全封闭式模块钻机,提升能力为 547 t,绞车功率为 1 470 kW(2 000 hp)。该平台开发井采用四开井身结构,套管直径 660.4~244.5 mm,应用水基钻井液钻进,因环保要求高,所有钻井液与岩屑处理后全部回收,采用尾管完井或者裸眼完井,单井钻井周期约 2~3 个月,完井周期约 5~15 d。

#### 2.1.2 人工岛

在水深 20 m 以浅且离岸距离在 10 km 以内的区块通常采用人工岛进行油气田开发,如图 2 所示。人工岛通常采用砾石建造,各岛之间可以通过砾石铺设的通道相连,油气通过海底管线进行运输。人工岛上一般使用全封闭低温钻机,该钻机采用耐低温钢材制造,能够在  $-20\sim-50^{\circ}\text{C}$  的环境下工作,内部配套供暖系统可保证人员安全和设备的正常运行。由于人工岛属于固定式平台,通常采用大位移井进行油气开发。人工岛的优势在于基础非常坚固,有效地解决了地基沉降等问题,并且能够抵御恶劣海况的影响。建造人工岛所需要的砾石等原材料大多为就地取材,大大减少了钢材用量及设备的运输量,适合在北极这样后勤保障困难的海域建造。人工岛的劣势是其无法移动,而且修建及维护的成本高昂,建造周期长,通常需要一个夏季的时间进行建造,而进入冬季又无法进行钻井作业,只能到第二年才能正式投入使用,所以人工岛适用于大型油气项目的开发。



图 2 人工岛

Fig. 2 Artificial island

### 2.2 探井钻井装备

极地冷海地区的探井钻井作业需要根据水深以及海况条件选择合适的钻井装备,目前通常采用抗冰自升式平台、耐低温全封闭半潜式平台及浮式平

台进行钻井作业<sup>[18]</sup>。

### 2.2.1 抗冰自升式平台

当水深 50~100 m、离岸距离超过 20 km、夏季和海况条件适宜时,探井可以采用抗冰自升式平台进行钻井作业。但是必须考虑极端海况(尤其是海冰)的影响,根据海冰的参数(包括漂流速度、厚度、抗压强度等)和平台迎冰面的结构来确定作用于平台上的冰载荷,同时需考虑低温对平台装备的影响。Marathon Endeavour 自升式平台采用四桩腿结构(见图 3),能够有效抵御浮冰,并且选用全封闭式井架和耐低温结构材料,能够在-30 °C 条件下进行钻井作业,最大作业水深 110 m<sup>[19]</sup>。该平台曾在 Chukchi 海和 Beaufort 海进行过探井钻井作业。



图 3 抗冰自升式平台

Fig. 3 Ice resistant Jack-up platform

### 2.2.2 全封闭半潜式平台和浮式平台

在水深超过 100 m、离岸距离超过 20 km 时,探井钻井作业主要使用能够抵抗浮冰的全封闭半潜式平台和浮式平台。半潜式平台的优势在于能够在更深的水深条件下进行钻井作业,采用全封闭结构也能够有效保证作业人员的安全和设备的正常运行。但由于受到极地恶劣天气的影响,一旦遭遇暴风雪平台发生横向漂移,隔水管和水下井口将产生很大的变形和涡激振动<sup>[7]</sup>,需要加强隔水管系统和水下井口的强度和稳定性。由于受恶劣天气的影响,浮式平台能够开展钻井作业的时间非常有限,全年钻井作业时间不超过 120 d,因此对作业效率的要求更高。

## 3 极地冷海钻井关键技术

针对以上钻井挑战,需要突破低温钻井液和固井技术、冻土层钻井技术、万米大位移井钻井技术、

极地灾害风险评价及控制技术、钻井废弃物环保排放技术等关键技术瓶颈,才能实现极地冷海地区的安全高效钻井作业。

### 3.1 低温钻井液和固井技术

极地冷海海底广泛覆盖着多年冻土层和天然气水合物,钻遇这些地层时为了保持地层的稳定性,需要采用低温钻井液体系并控制钻井液的热交换,抑制地层中天然气水合物的分解<sup>[20]</sup>。因此,一方面需要通过钻井液冷却系统使钻井液保持较低的温度,防止井壁发生热融坍塌;另一方面需要研制能够在 0 °C 左右甚至 0 °C 以下仍具有良好流变性和稳定性的低温钻井液体系<sup>[6]</sup>。

目前钻井液冷却系统已经应用于天然气水合物钻探和取心作业中,其原理是使用乙二醇等载冷剂与井内的钻井液进行热交换,动态控制井内钻井液的循环温度稳定在-5~5 °C。该系统目前存在的主要问题是在起下钻等需要停泵的作业过程中,井眼内钻井液停止循环后,换热器仍然在持续制冷,容易造成换热器中的钻井液结冰而发生堵塞。钻井液漏失量大或需要大排量钻进时,由于该系统制冷能力有限,无法实现钻井液的快速冷却<sup>[21]</sup>。因此,需要提高钻井液冷却系统的换热效率,增强制冷能力,保证在钻井液漏失或大排量钻进过程中实现钻井液的快速冷却,并能够实时监测和控制换热器及井筒内的钻井液温度,防止因为局部过冷而造成结冰堵塞。

低温流变性和护壁性是反映低温钻井液体系性能的主要参数。根据俄罗斯北极地区的钻井经验,低温钻井液体系的常用配方为无固相聚合物+耐低温介质+无机盐+水合物抑制剂+降滤失剂。该体系利用 NaCl、KCl 等无机盐来降低钻井液的结冰点,保持其良好的低温流变性<sup>[6,22]</sup>。试验研究表明:NaCl 的含量达到 5%~10% 时,低温钻井液的结冰点可达到-10 °C,能够满足冷海钻井作业需求。利用无固相聚合物(聚乙烯醇、聚丙烯酰胺和羟基甲基纤维素等)来强化钻井液的护壁性能,配合乙二醇等醇类抑制地层中天然气水合物的分解,从而起到维持井壁稳定的作用。该钻井液体系在我国漠河低温钻井中取得了良好的效果<sup>[23]</sup>。为了更好地满足极地冷海钻井的需要,还需加强适用于 0 °C 和 0 °C 以下条件的低温水基和油基钻井液体系研究,并开展低温泡沫、气体等钻井流体在极地冻土层的适应性研究<sup>[24]</sup>。

在北极冷海地区进行固井作业时,水泥浆凝固过程中因水化反应而释放热量,从而造成冻土层融化,如果冻土层中含有天然气水合物,还将诱发天然气水合物大量分解,导致井涌、井喷等钻井风险。低温会导致出现水泥浆凝固缓慢、强度降低等问题<sup>[25]</sup>,因此在设计水泥浆配方时,需要降低水泥浆固化时水化反应的放热量,同时保证其在需要的时间内胶结并达到足够的强度。Schlumberger 公司研发了 ARCTICSET 水泥浆体系,其自由水分离度低、渗透率低、耐温性好,并且胶凝强度可以控制。该水泥浆体系中添加了防冻剂,确保在低温下水泥发生水化反应之前混合水不会结冰,其适用范围较广。目前在深水油气井固井中已经广泛应用低温早强型水泥浆体系,但是应用地层温度主要在 4 ℃左右,而极地冷海地区的环境温度常年在 0 ℃以下,因此还需研究适用于 0 ℃和 0 ℃以下环境温度的具有早期强度高、低水化放热的环境友好型低温水泥浆体系。

### 3.2 冻土层钻井技术

冻土层是极地冷海钻井作业的关键难题。根据国内外冻土层钻井作业经验,冻土层钻井常见的井下复杂情况包括<sup>[26]</sup>:1)井壁坍塌,产生原因是钻头切削和钻井液循环造成冻土层孔隙水融化,使地层强度和稳定性严重下降,从而引起井壁坍塌;2)钻具冻结,因冻土层融化导致井眼发生热融性缩径、低温造成钻井液黏度增加,如果停钻时间过长,容易造成钻具冻结;3)气侵、井涌,钻井过程中冻土层因温度升高而稳定性变差,天然气水合物分解产生的天然气进入井筒造成气侵,严重时可导致井涌或者井喷;4)钻井液漏失,冻土层融化导致井壁失稳和地层渗透率增加,容易引起钻井液漏失;5)井斜,冻土层和天然气水合物层具有软硬交错、倾角大的特性,在钻进过程中容易出现井斜;6)井口失稳下沉,钻井过程中井下热流体不断循环导致上部冻土层融化并产生沉降,造成钻机和井口地基下沉。

从以上分析可以看出,钻井过程中产生的热量导致冻土层融化是造成井下故障的主要原因。为解决冻土层融化的难题,除了需要研究钻井液循环及钻头切削对冻土层温度场的影响外,还需要探索钻井新技术和新工艺。俄罗斯在西西伯利亚的冻土层钻井中使用了套管钻井(drilling with casing, DWC)技术,可以一趟钻完成钻进和下套管作业,不但提高了作业效率,而且能够有效解决冻土层钻井中的井壁失稳问题。DWC 技术在俄罗斯 Bovanen-

kovskoe 油田 0~450 m 厚的冻土层钻井中进行了应用,使用 φ324.0 mm 表层导管配合 φ393.7 mm 钻头直接进行一趟钻进,冻土层平均钻井作业时间从 4 d 减少到 2 d,单井钻井成本降低 7 万多美元<sup>[27]</sup>。但 DWC 技术还存在套管易损坏、环空间隙小、容易造成堵塞和卡钻等问题,目前未能得到广泛应用。也有国外公司在冻土层钻井中应用了真空隔热套管技术,套管外层选用隔热材料,可将下部地层的高温流体和冻土层隔绝开,有效阻止井筒中的钻井液热量传递给地层,实现在冻土层中快速安全钻进。我国的冻土层钻井技术尚处于起步阶段,虽然在寒冷地区积累了一定的作业经验、有一定研究基础,但是缺乏完整的理论体系和成熟的工艺,亟待研究建立包括冻土层钻井井壁稳定性评价、井身结构优化设计和井筒压力控制方法在内的理论体系,研制适用于冻土层钻井的钻头、钻井液、固井水泥浆等系列产品,同时推进低温气体钻井、套管钻井和隔热套管等特殊工艺和设备的研究。

### 3.3 万米大位移井钻井技术

由于极地冷海地区恶劣的自然条件,开发井主要使用坐底式平台或人工岛进行作业,但是其建造成本高昂,为了扩大平台或人工岛的控制开采面积,需要采用大位移井进行油气开发。目前世界上井深超过 10 km 的大位移井大部分位于北极地区,万米大位移井钻井技术在极地冷海油气开发中发挥了重要作用,中国石化在俄罗斯萨哈林区块的钻井作业中积累了一定的万米大位移井钻井经验。为保证万米大位移井的顺利施工,还需要开展水平井眼延伸极限能力的制约因素研究,解决万米大位移井的井眼轨道设计与轨迹控制、防磨减阻等技术难题<sup>[28]</sup>。同陆上大位移井相比,极地冷海地区的大位移井钻井作业需要选用能够适应低温环境的全封闭低温钻机(见图 4)。该钻机应用了耐低温金属和非金属材料,可保证其结构强度和密封性能满足 -50 ℃ 的作业环境需求<sup>[10]</sup>。

### 3.4 极地冷海灾害风险评价及控制技术

极地冷海钻井面临恶劣天气、浮冰、浅层地质灾害等多种典型作业环境风险因素,如果处理不当,轻则造成井下故障,重则导致钻井失败、平台报废和人员伤亡。因此,在钻前对这些风险因素进行准确识别,并对其产生的工程风险进行科学评价,形成一套行之有效的应对措施和处理方法,规避灾害性钻



图 4 全封闭低温钻机

Fig. 4 Fully enclosed drilling rig at low temperature

井事故的发生,是实现安全钻井的前提和基础。目前国内外主要在浅水和深水浅部地层的浅层气、浅水流和天然气水合物等浅层地质灾害预测和风险评价与控制方面取得了阶段性成果<sup>[29~30]</sup>,但这些预测模型和评价方法很难应用于极低温环境的极地冷海地区<sup>[31~32]</sup>。所以该技术的主要攻关方向为:研究区域浮冰周期分布规律、浮冰运动动态监测,形成浮冰防治方案,解决极地冷海钻井浮冰风险控制的问题;研究极地浅层地质灾害预测和风险评价方法,解决浅层地质灾害的准确预测问题,形成浅层钻井作业风险安全控制方法,解决极地冷海钻井作业风险控制难题。

### 3.5 钻井废弃物环保排放技术

国内外主要从 2 个方面开展了海洋钻井液环保排放研究工作<sup>[22,33]</sup>:一是无污染的海水钻井液技术,二是有污染的钻井液回收技术。目前海洋浅层井段一般采用海水钻井液开路循环钻井方式,海水钻井液及岩屑直接排入大海,这种方式既经济又环保。但极地冷海的苛刻低温环境会使海水流变性变差,所以这种方式不能满足极地冷海钻井的技术要求。国外正在研发的无隔水管钻井液回收(RMR)技术能够有效解决钻井液对于海洋环境的污染。RMR 钻井系统主要包括吸入模块、海底泵与固相控制系统、动力控制装置和回流管汇,通过废弃钻井液收集与处理系统、钻屑收集与处理系统、生活污水收集与处理系统,实现钻井液回收零排放,达到极地冷海地区的环保要求<sup>[34]</sup>,但处理后的大量废弃物还需要运到陆地,需要高昂的运费和二次环保处理。所以极地冷海钻井废弃物环保排放技术研究需要突破的关键技术是钻井废弃物的无害化处理技术和环境友好型环保钻井液技术,以实现钻井废弃物的就

地处理与环保排放,做到既环保又经济。

## 4 结束语

极地冷海钻井面临低温、海洋环境恶劣、地质条件复杂、后勤保障困难和环保要求高等一系列技术难题,我国通过萨哈林等油气开发项目,开展了冷海钻井技术研究与实践,在极地冷海钻井装备及工具的研制中取得了一定的突破,但并未形成成熟的系列化极地冷海钻井工艺和技术,还需要在充分借鉴国外低温地区钻井作业经验和技术的基础上,开展针对性的技术攻关:1)加大低温钻机、全封闭抗冰平台以及耐低温新型材料等低温钻井关键装备与材料的设计与研发力度,推进钻井装备的模块化和智能化;2)加强低温钻井液和固井技术、万米大位移井钻井技术、冻土层钻井技术、灾害风险评价和控制技术、钻井废弃物环保排放技术等极地冷海钻井关键技术研究,尽快形成具有自主知识产权的极地冷海钻井技术;3)建立适用于极地冷海环境的物质供应与保障体系和应急救援系统,实现极地冷海地区的安全高效钻井作业。

**致谢:**在本文撰写过程中,俄罗斯国立古勃金石油天然气大学的 V. Kadet 博士提供了俄罗斯极地钻井完井的相关资料,在资料的搜集和整理过程中得到了中国石化石油工程技术研究院侯绪田、柯珂、王磊等同志及中国石油大学(北京)博士研究生李莅临的大力帮助,特此感谢。

## 参 考 文 献

### References

- [1] HAMILTON J M. The challenges of deep-water Arctic development[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2011, 21(4): 241~247.
- [2] 余本善,孙乃达.全球待发现油气资源分布及启示[J].中国矿业,2015,24(增刊1):22~27.
- [3] YU Benshan, SUN Naida. The distribution of global undiscovered hydrocarbon resources and enlightenment[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(supplement 1): 22~27.
- [4] 李浩武,童晓光.北极地区油气资源及勘探潜力分析[J].中国石油勘探,2010,15(3):73~82.
- [5] LI Haowu, TONG Xiaoguang. Exploration potential analysis of oil and gas resource s in Arctic Regions[J]. China Petroleum Exploration, 2010, 15(3): 73~82.
- [6] 朱凯.北极海上钻井模式及发展趋势[J].内江科技,2016,37(2):71~73,75.
- [7] ZHU Kai. Arctic offshore drilling model and development trend [J]. Neijiang Science & Technology, 2016, 37(2): 71~73, 75.
- [8] 党学博,李怀印.北极海洋工程模式及关键技术装备进展[J].石油工程建设,2016,42(4):1~6.
- [9] DANG Xuebo, LI Huaiyin. Offshore engineering modes and key technologies in Arctic [J]. Petroleum Engineering Construction, 2016, 42(4): 1~6.
- [10] 路保平,李国华.俄罗斯萨哈林海洋钻井总承包工程[M].东营:中国石油大学出版社,2009.
- [11] LU Baoping, LI Guohua. EPC drilling project in Sakhalin off-

- shore of Russia[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2009.
- [7] 孙宝江. 北极深水钻井关键装备及发展展望[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(3): 7-12.  
SUN Baojiang. Progress and prospect of key equipments for Arctic deepwater drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(3): 7-12.
- [8] 郭晓琼. 中俄经贸合作新进展及未来发展趋势[J]. 俄罗斯学刊, 2016, 6(3): 10-18.  
GUO Xiaoqiong. New progress in economic and trade cooperation between China and Russia and the future development trend [J]. Academic Journal of Russian Studies, 2016, 6(3): 10-18.
- [9] 卢景美, 邵滋军, 房殿勇, 等. 北极圈油气资源潜力分析[J]. 资源与产业, 2010, 12(4): 29-33.  
LU Jingmei, SHAO Zijun, FANG Dianyong, et al. Analysis of oil-gas resources potential in the Arctic Circle[J]. Resources & Industries, 2010, 12(4): 29-33.
- [10] 李鸿涛, 陶平安, 王志忠, 等. ZJ40/2250DBG 低温轨道钻井装备的研制[J]. 石油机械, 2014, 42(11): 64-68.  
LI Hongtao, TAO Ping'an, WANG Zhizhong, et al. Development of ZJ40/2250DBG low-temperature track drilling rig [J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(11): 64-68.
- [11] SUBBOTIN E. Oil offloading solutions for the Pechora Sea exemplified by the Prirazlomnoye Field[D]. Stavanger: University of Stavanger, 2015.
- [12] 张鲁新. 多年冻土, 世界范围内的难题[J]. 中国计算机用户, 2005(43): 21.  
ZHANG Luxin. Permafrost, the world's problems[J]. China Computer Users, 2005(43): 21.
- [13] YAKUSHEV V S. Permafrost impact on gas fields development in the Russian onshore Arctic (Yamal Peninsula)[R]. OTC-25504-MS, 2015.
- [14] WHITEMAN G, HOPE C, WADHAMS P. Vast costs of Arctic change[J]. Nature, 2013, 499(7459): 401-403.
- [15] 赵玮. 北极资源的开发和环境保护[J]. 试题与研究, 2013(21): 43.  
ZHAO Wei. Development and environmental protection of Arctic resources[J]. Shiti yu Yanjiu, 2013(21): 43.
- [16] 刘学, 王雪梅, 凌晓良, 等. 北极油气勘探开发技术最新进展研究[J]. 海洋开发与管理, 2014, 31(1): 37-41.  
LIU Xue, WANG Xuemei, LING Xiaoliang, et al. Research on the latest development of Arctic oil and gas exploration and development technology[J]. Ocean Development and Management, 2014, 31(1): 37-41.
- [17] 张琦. 俄罗斯北极地区油气田开发模式[J]. 油气田地面工程, 2013, 32(7): 18-19.  
ZHANG Qi. Development model of oil and gas field in Russian Arctic Region[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2013, 32(7): 18-19.
- [18] 董智惠. 深水钻井船总体方案论证[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.  
DONG Zhihui. Research on the preliminary concept design of deepwater drillship[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [19] WASSINK A, van der LIST R. Development of solutions for Arctic offshore drilling[R]. SPE 166848, 2013.
- [20] 张凌, 蒋国盛, 蔡记华, 等. 低温地层钻进特点及其钻井液技术现状综述[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(4): 69-72.  
ZHANG Ling, JIANG Guosheng, CAI Jihua, et al. Overview of low temperature formation characteristics while drilling and available drilling fluid technology[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006, 23(4): 69-72.
- [21] 李宽, 张永勤, 王汉宝, 等. 冻土区天然气水合物钻井泥浆冷却系统设计及关键参数计算[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(7): 45-48.  
LI Kuan, ZHANG Yongqin, WANG Hanbao, et al. Design of cooling system for gas hydrate drilling mud in frozen soil region and the calculation of important factors[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(7): 45-48.
- [22] 路保平. 深水钻井关键技术与装备[M]. 北京: 中国石化出版社, 2014.  
LU Baoping. Key technologies and equipments for deepwater drilling[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2014.
- [23] 贾瑞, 孙友宏, 郭威, 等. 东北冻土区天然气水合物科学钻探试验及钻进效率影响因素分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(4): 6-9.  
JIA Rui, SUN Youhong, GUO Wei, et al. Northeast permafrost gas hydrate scientific drilling test and the analysis of factors influencing drilling efficiency[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(4): 6-9.
- [24] 刘华南. 冻土层钻探低温泡沫冲洗液的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.  
LIU Huanan. Research on low temperature foam flushing fluid used in frozen soil layer drilling[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [25] 王建东, 屈建省, 高永会. 国外深水固井水泥浆技术综述[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(6): 54-56.  
WANG Jiandong, QU Jiansheng, GAO Yonghui. The review of deep sea cementing slurry technology abroad[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005, 22(6): 54-56.
- [26] TORSÆTER M, CERASI P. Mud-weight control during Arctic drilling operations[R]. OTC 25481, 2015.
- [27] ANDREY B, GURBAN V, STANISLAV K, et al. Drilling with casing system continues successful drilling of permafrost sections in Arctic Circle of Western Siberia (Russian Federation)[R]. OTC 24617, 2014.
- [28] 高德利, 朱旺喜, 李军, 等. 深水油气工程科学问题与技术瓶颈: 第147届双清论坛学术综述[J]. 中国基础科学, 2016, 18(3): 1-6.  
GAO Deli, ZHU Wangxi, LI Jun, et al. Scientific problems and technical bottlenecks in deepwater oil & gas engineering: Academic Review of the 147th Shuangqing Forum[J]. China Basic Science, 2016, 18(3): 1-6.
- [29] 孙宝江, 张振楠. 南海深水钻井完井主要挑战与对策[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(4): 1-7.  
SUN Baojiang, ZHANG Zhennan. Challenges and countermeasures for the drilling and completion of deepwater wells in the South China Sea[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(4): 1-7.
- [30] 徐鹏, 孙宝江, 董玉杰, 等. 用于处理深水浅层气的动力压井方法研究[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(1): 11-15.  
XU Peng, SUN Baojiang, DONG Yujie, et al. Dynamic well kill method for shallow gas pockets in deep water[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(1): 11-15.
- [31] 叶志, 樊洪海, 张国斌, 等. 深水钻井地质灾害浅层水流问题研究[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(6): 48-52.  
YE Zhi, FAN Honghai, ZHANG Guobin, et al. Investigation of shallow water flow in deepwater drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(6): 48-52.
- [32] 周波, 杨进, 张百灵, 等. 海洋深水浅层地质灾害预测与控制技术[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(1): 51-54.  
ZHOU Bo, YANG Jin, ZHANG Bailing, et al. Prediction and control technology of shallow geological hazards in deepwater area[J]. Marine Geology Frontiers, 2012, 28(1): 51-54.
- [33] 路保平, 李国华. 西非深水钻井完井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(3): 1-6.  
LU Baoping, LI Guohua. Key technologies for deepwater drilling & completion in west Africa[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(3): 1-6.
- [34] 高本金, 陈国明, 殷志明, 等. 深水无隔水管钻井液回收钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(2): 44-47.  
GAO Benjin, CHEN Guoming, YIN Zhiming, et al. Deepwater riserless mud recovery drilling technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(2): 44-47.