

# 极地海洋工程装备的应用现状及关键技术分析

师桂杰<sup>1</sup>, 冯加果<sup>2</sup>, 康美泽<sup>3</sup>, 张正艺<sup>4</sup>, 刘圆<sup>5</sup>

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 中海石油(中国)有限公司, 北京 100010; 3. 中国舰船研究设计中心, 武汉 430064; 4. 华中科技大学船舶与海洋工程学院, 武汉 430074; 5. 中国船级社天津分社, 天津 300457)

**摘要:** 极地海洋工程装备是我国参与北极海洋油气开发的主要平台与实力象征。我国极地海洋工程装备设计建造与配套能力难以得到认可, 这与造船大国地位不匹配, 迫切需要寻求解决方法。本文分析了我国对极地海洋工程装备的发展需求, 梳理了极地海洋工程装备的应用现状, 提炼极地海洋工程装备的关键技术, 总结我国极地海洋工程装备存在的问题。最后, 本文提出成立“北极海上油气勘探开发共性关键技术研发及应用创新”专项, 设立“极地海洋油气工程技术国际研发中心”, 成立“中俄北极能源合资公司”等发展建议。围绕北极开发能力与环境保护能力的协调发展, 本文研究可为我国发展极地海洋工程装备提供参考, 为我国跻身俄罗斯北极油气开发业务提供指导。

**关键词:** 北极海洋油气; 低温; 海冰; 脆弱生态; 海洋工程装备

**中图分类号:** P75      **文献标识码:** A

## Polar Offshore Engineering Equipment: Development Status and Key Technologies

Shi Guijie<sup>1</sup>, Feng Jiaguo<sup>2</sup>, Kang Meize<sup>3</sup>, Zhang Zhengyi<sup>4</sup>, Liu Yuan<sup>5</sup>

(1. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100010, China; 3. China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China; 4. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 5. China Classification Society Tianjin Branch, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** Polar offshore engineering equipment provides a major platform and symbolizes the strength of China to participate in Arctic offshore oil and gas development. Currently, the design, construction, and support capacities of China's polar offshore engineering equipment are not internationally recognized, which does not match with the large shipbuilding sector of China. In this article, we analyze the development demand for polar offshore engineering equipment in China, present the application status of these equipment, investigate the key technologies, and summarize the existing problems regarding these equipment in China. Furthermore, we propose the establishment of a research and application innovation project of common key technologies for Arctic offshore oil and gas exploration and development, an international research and development center for polar offshore oil and gas engineering technologies,

**收稿日期:** 2020-04-20; **修回日期:** 2021-02-15

**通讯作者:** 师桂杰, 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院高级工程师, 研究方向为船海结构安全与海洋装备战略;

E-mail: sgj2004@sjtu.edu.cn

**资助项目:** 中国工程院咨询项目“‘冰上丝绸之路’北极油气海工装备发展策略研究”(2019-XY-48); 国家自然科学基金资助(51809168); 上海交通大学新进青年教师启动计划资助(17X100040060); 上海交通大学文理交叉专项基金资助(17JCYB08)

**本刊网址:** www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

and a China–Russia Arctic energy joint venture company. This study centers on the coordination of the Arctic development and environmental protection capabilities, and aims to provide a reference for developing the polar offshore engineering equipment in China and provide guidance for China’s participation in Arctic oil and gas development.

**Keywords:** Arctic oil and gas; low temperature; sea ice; vulnerable ecology; offshore engineering equipment

## 一、前言

北极自然环境恶劣,存在低温考验、海冰阻碍、冰山袭击、暴风雪袭击、生态环境脆弱、极夜困扰、能见度差等挑战,因此,对极地海洋工程装备提出了严格要求。北极具有丰富的油气资源,2008年美国地质调查局评估报告显示,北极待发现石油900亿桶,占全球13%,天然气 $4.7 \times 10^{13} \text{ m}^3$ ,占全球30%。其中,俄罗斯储量最大,约占58%,大部分为天然气资源[1]。本文主要分析用于北极海洋油气开发的极地海洋工程装备。

随着北极海冰的消融,东北航道货运规模提升,黄金水道价值逐渐体现,无冰级船舶通航时间从每年的7月初到9月底,PC4冰级以上可全年通航东北航道[2],北极油气开采与运输技术难度降低。由于北极油气开发风险高、投资大,降低油气开发成本并保证安全唯有依赖高端极地海洋工程装备。据统计,2012—2018年北极油气开发投资的50%以上用于输油管道建设,31%投资用于海工平台建设,其中固定式平台投资占75%[3]。近十年,北极油气开发的重要油气工程包括:加拿大纽芬兰 Terra Nova 与 White Rose、挪威 SnØhvit 与 Goliat、俄罗斯 Sakhalin II 与 Yamal LNG 等[4]。

目前,俄罗斯是北极油气开发的主要推动者,其国家战略视北极为能源战略基地,通过制定政策降低北极油气开发税率,提高外资允许占比,吸引外方投资与技术服务。俄罗斯本土公司如诺瓦泰克、俄罗斯天然气工业股份公司、俄罗斯石油公司,法国道达尔公司,意大利埃尼集团,英国壳牌集团等非北极国家油气企业纷纷抢滩北冰洋[5]。2014年,欧美对俄罗斯进行石油产业制裁[6],包括限制投资或提供设备/技术出口,并延伸至已签订合同项目。俄罗斯迫切希望中方参与北极油气资源开发,包括金融投资、油气开采、装备制造、能源运输等项目合作。

我国是世界贸易大国、能源进口大国与造船大

国,参与北极油气资源开发有利于我国经济发展、能源供应与海洋装备出口。但是,我国参与北极油气开发时间晚且规模较小、极地海洋工程装备能力弱、尚有关键技术仍未突破,不能满足我国参与北极油气开发的战略需求。本文基于能源供应与装备出口等角度,分析我国极地海洋工程装备的发展需求;结合总体油气分布情况与开发现状,分析极地海洋工程装备的总体应用现状;围绕北极油气开发难点,分析并提出北极油气装备的关键技术;最后提出我国极地海洋工程装备的发展建议,为国家及相关行业参与北极油气开发提供参考。

## 二、我国极地海洋工程装备的发展需求

### (一) 促进北极海上油气开采,构建北极能源进口的稳定渠道

北极政治环境稳定、海上航线较短,我国未来经济社会发展对油气进口额度持续增加,对北极丰富的油气资源存在重大需求,建立能源供应的多元渠道是保障我国能源安全的重要措施。随着北极油气开发规模增加,“冰上丝绸之路”有望成为我国能源进口的主要渠道之一。发展极地油气海洋装备,通过装备出口、工程服务、金融投资等多种方式深度参与北极油气开发,为低价竞争北极油气进口份额提供装备支撑,有利于满足我国社会经济发展对能源进口增长的硬性需求。

### (二) 降低北极油气项目实施风险,维护我国北极油气投资安全

我国适时支持俄罗斯北极油气开发,2013—2016年收购俄罗斯北极 Yamal 液化天然气(LNG)项目29.9%股份,提供银行贷款总计120亿美元,参与海洋装备建造、油气田工程服务、港口建设等项目。2019年中国石油天然气集团有限公司与中国海洋石油集团有限公司分别收购俄罗斯北极 LNG-2 项目10%股权,未来北极 LNG-3 ~ LNG-7 项目仍

是我国海外投资的重要方向。目前我国在北极直接投资规模超 300 亿美元，巨额投资风险不容忽视，油气勘探不利、油气泄露事故、装备建造延期等均会导致项目推迟甚至失败。依托我国完善的工业体系与科技体系，发展极地油气海洋装备技术，突破北极恶劣自然环境束缚，具备参与俄罗斯北极油气开发的技术实力，才能更好地维护我国海外投资安全与投资收益。

### （三）带动极地战略新兴产业发展，推动海洋强国建设

北极油气开发的海洋装备价值巨大，以正在开发的北极 LNG-2 项目为例，该项目新建重力式混凝土平台、破冰型 LNG 运输船、破冰型油船等装备订单总价超过 120 亿美元。根据初步统计，计划开发北极油气项目超过 10 个，预计北极油气海洋装备未来订单将超数千亿美元，为船舶工业发展提供巨大市场。我国发展极地油气海洋装备，突破防寒保温、破冰除冰、冻土钻探、冰下通信导航等关键技术，推动低温新材料、极地装备制造等战略性新兴产业发展，对我国经济社会长远发展具有重大拉动作用。

### （四）积累北极数据资料与作业经验，提升对北极环境的科学认知

我国参与北极油气资源开发，带动装备技术与专业团队进入北极，利用北极作业活动时机，加强北极环境与资源调查，全面掌握北极地质、水文、声电磁场、能源等分布，增强我国对北极科学认知，开展国产极地油气海洋装备的实地评估，积累北极海上与海底的作业活动经验，提高我国在北极的应急救援与国际治理能力。

## 三、极地海洋工程装备的应用现状

对于环北极国家，俄罗斯北极油气储量最大且开采态度最积极 [7]，挪威北极油气开采技术经验丰富 [8]，美国与加拿大对北极油气开采具有不确定性，格陵兰与冰岛有预测储量但未实质开采。未来，俄罗斯、挪威、冰岛、丹麦四国是我国未来参与极地资源开发的潜在合作国家，其中俄罗斯是最大合作伙伴，未来中俄能源贸易增量将主要来自北极海上。

### （一）北极油气勘探装备

适合北极海上油气勘探的装备非常有限，主要采用抗冰钻井船与抗冰半潜式钻井平台，还研发了圆形钻井平台概念设计，可全年在北极工作。北极油气勘探海洋装备主要设计因素包括海冰、波浪、水深、气象与作业时间，其关键系统为钻井装置、海冰控制系统、定位系统、举升系统和水下设备。

极地钻井船具有甲板面积大、自给能力强、机动灵活等特点。2007 年英国 Stena 钻井公司委托韩国三星重工株式会社建造全球首艘极地深水钻井船 DRILLMAX ICE IV，造价 11.5 亿美元，相当于 2~3 倍常规钻井船造价。该船主尺度为船长 228 m，排水量  $9.7 \times 10^4$  t，设计温度  $-40^\circ\text{C}$ ，PC5 冰级，设计作业水深 3000 m，最大钻井深度 10 000 m，采用动力定位 DP3，抵抗 16 m 海浪和 41 m/s 海风。

极地半潜钻井平台适用于深水区，仅适用于低冰情区域。2001—2019 年建造的极地半潜钻井平台见表 1。2014 年，中集来福士海洋工程有限公司为中海油田服务股份有限公司建造的第四座深水半潜式钻井平台“中海油服兴旺号”（COSL PROSPECTOR），该平台型长 104.5 m，型宽 70.5 m，型高 37.55 m，最大工作水深 1500 m，最大钻井深度 7600 m，满足冰级、环保和低温作业要求，能够在挪威北海的恶劣环境下作业。2015 年，中集来福士海洋工程有限公司为挪威建造的极地半潜式钻井平台“维京龙”号，是我国建造的首座适合北极海域作业的深水半潜式钻井平台。该平台最大工作水深 500 m，可升级到 1200 m，最大钻井深度 8000 m，配置了 DP3 动力定位系统和八点系泊系统，最低服务温度为  $-20^\circ\text{C}$ ，满足冰级需求。

### （二）北极油气开发装备

北极海上油气开采模式包括海油陆采、固定式平台、浮式平台、海底开采四大类型 [9]，见表 2。北极油气开发海洋装备包括人工岛、混凝土重力式平台、浮式生产储卸油装置（FPSO）、浮式平台、水下生产系统等。

人工岛主要用在美国、加拿大、俄罗斯北极近海区域，属于海洋工程与土木工程的交叉领域。其优点为建岛速度快、成本低、有效场地面积更大，关键技术包括挖泥船冰区吹填、冻土施工、边坡稳定等。

表 1 2001—2019 年建造的极地半潜钻井平台

船名	建造时间/年	建造国家	船长/m	最大钻深/m
钻油台埃里克森 (Leiv Eiriksson)	2001	中国	119	9100
西凤凰 (West Phoenix)	2008	韩国	83	9100
跨洋斯皮斯伯格 (Transocean Spitsbergen)	2009	挪威	120	9100
北极星 (Polyarnaya Zvezda)	2010	俄罗斯	122	7500
北极光 (Severnoye Siyaniye)	2011	俄罗斯	126	7500
甲虫8 (Scarabeo 8)	2011	意大利	119	10 600
中海油服兴旺 (COSL PROSPECTOR)	2014	中国	105	7600
颂嘉激励 (Songa Encourage)	2015	韩国	116	8500
维京龙 (North Dragon)	2015	中国	107	8000
颂嘉驱动 (Songa Enabler)	2016	韩国	116	8500
海洋石油982 (Hai Yang Shi You 982)	2018	中国	105	9100
比肯太平洋 (Beacon Pacific)	2019	中国	107	8000

表 2 北极海上油气开采模式

主要模式	装备类型
海油陆采	海油陆采, 如俄罗斯萨哈林气田
固定式平台	人工岛+海底管道, 如美国Northstar项目 混凝重力式平台+穿梭油轮或海底管道, 如俄罗斯PA-B项目 导管架平台+海底管道, 如美国库克湾地区
浮式平台	FPSO+水下系统, 如挪威Goliat 项目 浮式平台+海底管道, 如挪威Aasta Hansteen项目
海底开采	水下生产系统+陆上终端, 如挪威SnØhvit项目

混凝土重力式平台是目前北极使用最广泛的生产平台, 主要适用于浅水区 (水深 <100 m)。典型代表为 Hibernia 平台、Prirazlomnaya 平台、LNG-2 平台。其核心结构为沉箱、立柱和上部甲板; 其优点为下部沉箱储油, 平台依靠自身重量保持稳定, 抵抗海冰环境荷载能力和抗腐蚀能力更强。

FPSO 应用于北极冰情不是很严重的区域。优点是具有抗风浪能力强、适应水深范围广、储/卸油能力大、可移动、重复使用; 缺点是受波浪、海冰等环境荷载影响较大。北极有 4 个在产项目使用 FPSO, 包括纽芬兰岛东部海域 Terra Nova 和 White Rose、挪威海的 Balder 油田以及挪威巴伦支海的 Goliat 油田。

水下生产系统成为深水油气开采的主要方式。其核心设备包括水下井口、采油树、水下管汇、跨接管、海底管道和立管系统等。其关键技术包括为防止海冰破坏, 水下井口和管汇低于海床、管道与设备之间采用弱连接技术、管道埋深较大。挪威 SnØhvit 项目是首个采用全水下系统开发的海上气

田, 离岸距离 145 km, 水深 250~345 m, 2007 年投产。

### (三) 北极油气运输装备

海上输油管道可串联海上生产平台与岸上设施、北极海上各平台之间、水下井头与生产平台之间、生产平台与附近装载浮体之间、水下井头与岸上设施之间等。海底管道是油气生产的“血管”, 串联起海底井头和海底生产设施, 有利于减少分布式油田所需平台的数量。

油气资源的船舶运输成本远低于海底管道, 运输范围更加灵活。极地 LNG 船设计应兼顾常规海况下的快速性、适航性以及冰区海况下的双向破冰性能, 通常采用吊舱式全回转电力推进系统。LNG 船舱主要采用球形和膜型两种形式。2016 年 11 月全球首艘北极专用 LNG 船“Christophe de Margerie”号顺利完工, PC4 冰级, 连续破冰厚度达 2.1 m, 新造价为 3.3 亿美元, 约为常规 LNG 船造价的 2 倍。

### （四）北极油气作业保障装备

后勤保障对于北极地区钻井作业的顺利进行至关重要，而极地供给船是确保后勤保障的关键。由于全年可钻井时间短，钻探成本高，需要保证钻井装置物资的持续供应以实现钻井作业连续进行。具有代表性的是阿克尔北极技术公司开发的“ARC105”型破冰平台供应船，主要用于为海洋平台和钻井船提供物资及设备，进行破冰/冰区管理作业，具备防火和救援能力，为海洋结构物提供救援和守护服务。

综上，目前北极油气勘探主要使用半潜式平台，未来带储油功能的新型钻井船将是发展方向。北极油气生产主要采用人工岛与重力式平台，未来随着走向深海，FPSO、Spar平台与水下生产系统将是主流。考虑到北极后勤保障距离遥远，同时具有钻井与生产功能的平台将受到市场欢迎。北极油气运输采用海底管道的成本太高，破冰型油船/LNG船将是未来油气运输的主力。极地海洋工程装备在抗冰、海冰管理、应急脱险、消防逃生、自给保障能力、环保性能等方面有特殊要求。

## 四、极地海洋工程装备的关键技术

### （一）北极海冰环境预报和海冰管理系统

北冰洋有常年不化冰盖、当年冰、大面积浮冰以及大块冰山，海冰环境研究是极地海洋工程装备设计建造以及作业的前提条件。北极海冰使结构物设计面临诸多挑战，例如海冰对结构物载荷、冰山碰撞安全性评估、冰水混合物中的航行性能评估等。研发特定作业区域的海冰监测系统，发展海冰分布遥感监测、海冰漂移监测、船基海冰力学性能采集系统、船载雷达冰情探测、冰下环境探测等关键技术，建立高精度海冰预报模型，准确预测海冰的威胁程度。

为实现较长的有效作业时间，北极海洋装备除提高抗冰撞能力之外，还应配备完整的海冰管理系统。海冰管理系统指的是避免浮冰或冰山与海工平台发生碰撞的海上活动总称，包括海冰监测与预报、冰情预警、破冰船舶管理等。研发作业区域周边海域冰情预警系统，建立破冰船智能协同作业管理系统，提高船队的总体破冰效率，用于破碎、拦截、

控制海冰，避免其对海洋装备的破坏。

### （二）极地海洋工程装备基本设计技术

北极水域冬季最低气温低于 $-50^{\circ}\text{C}$ ，夏季最高气温一般低于 $5^{\circ}\text{C}$ 。极地海洋装备的甲板机械设备及管系暴露在低温环境下，会发生设备冰冻、管系结冰、滑油流动性减弱等问题。极地海洋装备还会发生上浪结冰和低温冻雨结冰，对平台稳性和人员露天活动安全带来较大影响。重点攻关低能耗除冰、智能化除冰、防寒保温、节能降耗等低温防护与能源综合利用关键技术，满足低温环境下的长周期作业需求。

作业/航行于冰覆盖水域的海洋装备经常受到冰山、浮冰等碰撞与挤压，船体结构应提高抗冰能力，避免海冰破坏。由于调查、救助等作业需求，极地海洋装备突破连续冰盖束缚，需具备一定程度的破冰能力与推进能力。重点突破冰载荷预报与结构设计技术、大功率推进破冰技术、破冰下海作业等关键技术，满足极地海洋装备抗冰破冰需求。

北极油气作业对海洋装备的绿色环保、防寒保温、抗冰破冰等提供了特殊需求，具有勘探、开采、储存、油气预处理等大型综合功能平台/船舶受到市场欢迎，长周期航行北极水域的破冰型运输船成为极地开发首选装备。围绕北极油气开发需求，开展新型极地平台与船舶总体设计技术研究，突破开采处理储油一体化平台、高冰级船型设计、新型破冰船型设计等关键技术，填补极地海洋工程装备技术的空白。

试验方法是进行冰载荷预报的主要手段，新型极地船舶/平台航行性能、破冰性能、定位性能等评估通常依赖冰水池试验。不同常规水池试验，冰水池试验还应考虑试模拟冰的力学相似条件。由于在制冰工艺和制冷系统设计方面不同，冰水池模型试验方法和相似外推方法也不同。重点突破极地海冰模拟制备、平台抗冰性能测试等冰水池试验技术，建立冰水试验测试平台和评估系统。

### （三）极地海洋工程装备动力与配套技术

极地海洋装备动力装置应适应低温环境、偏远地区及其存在的海冰状况等操作条件，避免船舶停滞或被海冰围困进而引发海损或污染事故。柴电

动力系统是目前全球破冰船的主流,核动力更有利于保证船上的推进、供电、供暖等需求,双燃料动力代表未来绿色能源发展趋势。重点发展极地船用 LNG 动力、核动力、全回转推进器等动力与推进技术,服务于极地作业活动需求。

极地船舶/平台在定位时会受到浮冰、风、浪、流和潮汐等环境的联合作用,可采用纯动力定位、锚泊辅助以及纯锚泊定位三种方式,最大限度支持海上钻井采油工作进行。大块冰山与大面积浮冰使油轮和钻井平台面临危险,钻井平台应具备随时与油井断开的能力。重点发展极地锚泊与动力定位、锚泊与动力定位联合控制技术、高负载系泊快速脱离与重新连接等关键技术,满足作业定位需求。

声波是水下信息远距离传输的有效载体,水声信号处理及声呐设备研发在开发利用北极的活动中具有不可替代的重要作用,如冰下通信、导航、定位以及海洋环境、气候声学观测/探测等。通过研究冰下声学物理特性与冰下水声技术,解决极地环境下的声场特性认知、冰下网络化水声探测与通信机理等科学问题,研发极地分布式长期观测平台、冰下移动式声学观测平台、极地潜标及信息透冰通信系统、耐低温传感器、适应极地环境的声呐系统等极地水声设备与系统,实现冰下远程水声通信及组网,构建冰下探测、通信、定位的一体化能力。

极地船舶建造离不开适应极地恶劣环境的低温钢,其具有高强度、抗腐蚀、低温止裂、易焊接、耐冰水腐蚀等特点。极地生态环境脆弱,严格要求涂装材料的环保性,船体采用耐冰磨损的低摩擦涂层,LNG 工艺模块采用特有涂层防止 $-196^{\circ}\text{C}$ 的液化天然气飞溅到钢结构引发脆性断裂。重点开展发展船用低温高强钢、低温容器高强钢、低温非金属密封材料、防疏冰涂层材料、轻质保温防火材料、耐低温电缆材料等低温材料,突破耐低温、耐腐蚀、耐磨损、易焊接、高韧性等关键技术。

#### (四) 北极海洋油气钻井系统与工艺

北极冻土给基础施工带来较大困难,冻土层是极地冷海钻井作业的关键难题。冻土层钻井难题包括:钻井造成冻土层孔隙水融化,引起井壁坍塌;钻井导致冻土层温度升高,天然气水合物分解,造成气侵,严重时可导致井涌或者井喷。重点研制适

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。

北极油气开发主要使用坐底式平台或人工岛进行作业,为扩大平台或人工岛的开采面积,需采用大位移井进行油气开发,目前大位移井的水平位移记录已超过 10 km。开展水平井眼延伸极限能力的制约因素研究,解决万米大位移井井眼轨道设计与轨迹控制、防磨减阻等技术难题。

北极适合海上钻井的时间窗口为每年的 8 月初到 10 月初,最大浪高十几米,海域施工环境复杂,风浪大、气温低、大雾天气多,地层复杂,给钻井作业带来了很大风险。重点采用风险分析方法,识别各风险点的概率水平,制定可行的预备方案,实时掌握北极油气钻探的安全水平。

#### (五) 北极海洋油气水下系统与工艺

北极水下系统包括水下井口、采油树、水下管汇、海底管道和立管系统等,为防止海冰破坏北极水下井口和管汇低于海床,管道与设备之间采用弱连接技术,集输管道埋深较大,或上覆碎石/土保护。针对北极低温、海冰等特殊海洋环境条件,开展北极海底管道和立管以及水下生产系统基本设计技术研究,重点研究水下控制和通信技术、水下远距离供电技术、水下油气集输处理技术、水下管线总体设计等关键技术,满足油气生产耐高压、高防腐、大排量需求。

为扩展极地作业深度范围,冰下作业潜器是重要发展方向,在船上/岸上操控潜器实现冰下数百米水深的探测、测绘、目标识别、取样等工作,还可用于铺设水下通信系统与安装水下模块。研发冰下钻井机器人、冰下遥控无人潜水器(ROV)、载人作业型潜器等装备群,建立在北极水下活动的后发优势。

#### (六) 北极海洋油气事故救助技术

北极海上船舶海事事故偶有发生,导致燃油泄漏,破坏北极脆弱生态环境,为北极油气开发敲响了警钟。1989 年 3 月,美国埃克森美孚公司的油轮“埃克森·瓦尔迪兹”号在阿拉斯加北极附近触礁,原油泄出达 $8\times 10^6$ 加仑(1加仑 $\approx 3.79\text{L}$ )。2012 年 12 月,壳牌集团的“库鲁克”号拖航至阿拉斯加湾

时,拖绳断裂、漂流搁浅、燃油泄漏。重点开展冰区溢油声电磁探测技术、冰区溢油围控回收处理技术、北极溢油应急救援总体方案、冰下井喷封堵等研究,提高溢油事故防范和应急处置能力。

极寒条件下海洋装备消防逃生技术具有挑战性。北极海洋装备普遍采用封闭保温设计,有火灾隐患的设备设施安装在室内,易燃易爆内部积聚,燃爆可能性增加。工作人员穿着厚重防护服,海洋装备表面结冰与积雪,导致人员疏散困难。北极海上救援依靠破冰船、直升机等专业救助设备,海冰变化、复杂天气均会增加救援难度。重点开展北极海上逃生、疏散和救援技术、救生设备配备、应急救援后勤保障等研究,具备北极海上人命安全救助能力。

### (七) 极地海洋工程装备的绿色环保技术

为保护极地海洋环境,国际海事组织(IMO)颁布的强制性规则《极地规则》已于2017年1月1日正式生效实施。其要求高于IMO现有国际海上人命安全公约(SOLAS)、国际防止船舶造成污染公约(MARPOL)等要求。《极地规则》禁止或严格限制油类、化学品、生活污水、垃圾、食品废弃物以及其他物质的排放。北极国家严格限制油气作业带来的环境污染,俄罗斯规定在油气钻井作业过程中形成的岩屑、泥浆、生活污水、油污水、垃圾等均不能直接排放到大海中,通常采用拖轮运输至陆地处理,避免对海洋环境的污染破坏。黑碳对环境的最大影响是其带来的温室效应,对极地冰川消融作用尤为突出。加拿大、德国、芬兰等国家围绕测量方法、影响因素和减排技术开展研究,并建议IMO制定极地黑碳排放的控制措施,这将对船舶主机设计和减排控制技术产生影响。研究油气作业废水处理、黑碳排放控制等关键技术,满足北极作业的绿色环保需求,形成符合我国利益的建议案,积极参与国际规则制定。

极地船舶/平台在营运过程中需消耗大量能源。通过减少船舶阻力、提高推进效率、有效操作控制、引入清洁能源等方式,使极地船舶在同等效益下降低能源消耗,从而有助于提高船舶营运经济性、减少极地船舶营运所产生的气体排放。突破极地绿色能源动力、研究蓄电池低温续航能力

与快速充电系统,满足长周期冰区作业装备的绿色能源需求。

## 五、我国极地海洋工程装备存在的问题及技术发展重点

### (一) 存在问题

#### 1. 我国极地油气海洋装备自主研发能力薄弱

我国在极地海洋油气勘探开发技术及装备研发领域已具备一定基础,具有北极巴伦支海夏季无冰/少冰期勘探经验、北极LNG核心模块建造经验以及北极东北航道运输经验,北极海洋油气技术及装备的自主研发工作已起步。但我国在北极油气技术及装备研发工作基础仍十分薄弱,自主核心技术和核心装备数量非常有限,特别是极地海洋装备的基本设计几乎处于空白,极地钻井船、极地重力式平台、极地LNG船等装备均是设计建造空白区。

#### 2. 我国在北极油气工程作业的经验较少

我国冰区油气田作业主要集中在冬季渤海湾地区,冰厚小于90cm,在冰区油气田作业、抗冰平台建造、海冰监测管理等方面已有初步积累。相比渤海湾,北极冰层厚度、作业窗口期、后勤保障等方面具有显著不同,渤海湾油气装备技术难以直接应用于北极地区。由于缺乏足够的技术储备,我国参与北极工程投标、设计与施工缺乏话语权,尚不具备北极油气工程总包能力,难以主导北极油气合作。

#### 3. 我国在北极油气的合作项目非常有限

受欧美制裁,投资、设备与技术被迫退出俄罗斯北极油气项目。我国具有海洋装备制造优势、油气消费市场需求,进军北极油气项目恰逢其时。但是,我国在北极油气的国际合作项目非常有限,实际参与的北极油气勘探海域局限在巴伦支海、喀拉海的个别区块,尚未掌握北极油气储量与分布,缺少自主数据资料,无法准确评估北极项目的可行性。我国实际参与北极油气开发只有Yamal 1项,正在参与北极LNG-2项目,参与北极工程项目竞标缺乏话语权。我国只有从北极油气项目的“参与者”成长为实际“作业者”,才能掌握北极油气开发的决策权,才能带动更多国产装备产品与技术服务走向北极,才能保证我国安全、稳定地获得北极油气

战略资源。

#### 4. 我国对北极油气勘探开发的科研支持力度较弱

《中国的北极政策》白皮书指出，支持企业通过各种合作形式，在保护北极生态环境的前提下参与北极油气和矿产资源开发，促进在北极海域石油与天然气钻采。北极海上油气资源的勘探评估、开采运输以及工程实施均离不开高端极地海洋装备技术支持。自 2012 年以来，工业和信息化部、科学技术部支持了极地船舶、极地潜器以及极地环境探测的关键技术研发，立项支持极地装备基础共性技术研发。但是，北极海上油气资源高精度探测、工程地质勘察、项目风险评估、工程总体方案设计、海冰控制管理、冰下作业开采等一系列问题仍未解决，缺乏国家专项支持北极海上油气开发，仅依靠企业自身力量研发，短期内很难开拓北极油气开发合作的新局面。

### （二）技术发展重点

#### 1. 研发极地船用关键基础材料

极地船用关键基础材料包括低温用高强钢、低温容器高强钢、低温非金属密封材料、防疏冰涂层材料、轻质保温防火材料、耐低温电缆材料等，突破耐低温、耐腐蚀、耐磨损、易焊接、高韧性等关键技术，满足极地特殊环境工程装备需求。

#### 2. 研发极地船用绿色能源动力设备

研究极地船用 LNG 动力、核动力、全回转推进器等大功率推进技术，研究蓄电池低温续航能力与快速充电系统，满足长周期冰区作业装备的绿色能源需求；研究极地机械设备耐低温可靠性，突破低能耗防冰冻和大面积除冰技术，提高船用设备低温环境适应性。

#### 3. 研发极地海洋装备基础共性技术

研究极地船舶总体性能、冰载荷预报、结构安全评估、新型破冰技术、防寒防冻、低温润滑密封等关键技术，提升高冰级船自主研发水平，带动重型破冰船、极地 LNG 船、极地油船等重点船型发展；开展大型冰水池船模试验技术研究，提高复杂海冰条件的模拟能力，检验新型船舶破冰性能、冰区航行性能与锚系泊定位性能，验证船用设备低温环境的适应性。

#### 4. 研发极地油气资源勘探开发装备

研发极地物探船、极地钻井船、极地重力式平

台、极地浮式储油船等勘探开发装备，提升极地海洋装备研发设计水平，提高总装建造的国际市场竞争力；研发极地水下生产系统与冰下作业潜器，突破大口径低温油气阀门、低温试验检验、破冰下海作业、冰下探测等关键技术；研发极地油气钻井设备，突破极地冻土钻探技术、固井技术、水力压裂等关键技术，构建极地冷海钻完井作业与技术服务能力；研发海冰控制系统、溢油预警系统、溢油救助装备等作业保障装备，突破海冰监测预报、海冰拦截破碎、极地溢油预防、极地溢油处理等关键技术，建立极地油气泄露事故预防与应急处理能力。

## 六、我国极地海洋工程装备的发展建议

### （一）把握中俄北极油气合作窗口期，加快发展极地海洋工程装备

依托“冰上丝绸之路”倡议，以北极油气合作为抓手，把握中方参与俄罗斯北极油气开发的战略机遇，以极地海洋工程装备为基础和条件，通过技术服务能力提升，实现装备与技术捆绑，提升中方参与的广度与深度，推动建立北极能源进口渠道。

### （二）成立“北极海上油气勘探开发共性关键技术研发及应用创新”专项

以北极 LNG-2 项目为载体，围绕北极海洋油气装备研发、设计、建造以及应用面临的系列问题，重点开展极地船用关键基础材料、极地船用绿色能源动力设备、极地海洋装备基础共性技术与极地油气资源勘探开发装备研发，构建我国北极油气开发的装备和技术体系，提升中国参与中俄北极油气合作开发的作业能力。

### （三）成立以中俄为主体、多方参与的“极地海洋油气工程技术国际研发中心”

依托中俄双方北极海洋油气开发的石油公司，联合工程设计公司、生产建造企业、高校院所等优势资源，建立极地海洋油气装备的稳定研发团队，开展长期持续科研攻关，打通“产学研用”的科研成果转化渠道，对前沿技术与新型产品形成有效积累。该中心突破全产业链装备及系统核心技术，推动关键设备与部件的国产化，组织成果展示、技术培训、人员交流等国际合作，推动中俄装备研发及

应用合作的深度融合。

### (四) 建立中俄北极能源合资公司, 促进“冰上丝绸之路”务实合作

建立中俄北极能源合资公司, 开展特定油气区块的具体合作, 以合作方与参股方的身份参与北极海洋油气开发, 带动我国装备全面进入北极海洋油气勘探开发。同时, 提升油气开发装备在通信、导航等方面的服务能力, 促进冰上丝绸之路沿线互联互通, 为北极东北航线基础设施建设提供更经济的方案。

#### 参考文献

- [1] 王淑玲, 王铭晗, 邵明娟, 等. 俄罗斯大陆架地质调查及矿产资源开发利用现状 [J]. 中国矿业, 2016 (11): 28-34.  
Wang S L, Wang M H, Shao M J, et al. Geological investigation and current situation of exploitation of mineral resources in the continental shelf of Russia [J]. China Mineral, 2016 (11): 28-34.
- [2] 吴刚, 张东江. 极地船舶技术最新动向 [J]. 中国船检, 2015 (3): 97-101.  
Wu G, Zhang D J. Newly development of polar ship technologies [J]. China Classification Society, 2015 (3): 97-101.
- [3] Infield. Offshore Arctic oil and gas market report to 2018 [R]. Infield, 2018.
- [4] Allen S. 北极水下工程10年——北极开发的进步基石 [C]. 休斯顿: OTC 北极技术会议, 2011.  
Allen S. 10 years of Sub Arctic subsea projects—Stepping stones for Arctic development [C]. Houston: OTC Arctic Technology Conference, 2011.
- [5] 王春娟. 中国开发利用北极油气资源战略研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京)(博士学位论文), 2018.  
Wang C J. Study on China strategy of exploitation and utilization of Arctic oil and gas resources [D]. Beijing: China University of Geoscience(Beijing) (Doctoral dissertation), 2018.
- [6] 郭俊广, 管硕, 柏锁柱, 等. 俄罗斯北极海域合作开发现状 [J]. 国际石油经济, 2017 (3): 79-84.  
Guo J G, Guan S, Bai S Z, et al. Status of cooperation and development in Arctic offshore of Russia [J]. International Petroleum Economics, 2017 (3): 79-84.
- [7] Gurbanova N. 论俄罗斯北极油气资源开发对俄罗斯经济的积极影响 [J]. 经济视角, 2017 (3): 101-108.  
Gurbanova N. The positive effect of Arctic oil & gas development on Russia economics [J]. Economic Vision, 2017 (3): 101-108.
- [8] 张春宇, 赵越, 王珞. 阿拉斯加北坡区域地质演化及油气资源 [J]. 地质力学学报, 2014 (4): 392-403.  
Zhang C Y, Zhao Y, Wang L. Geological evolution and hydrocarbon resources potential in north slope's Alaska [J]. Journal of Geomechanics, 2014 (4): 392-403.
- [9] 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 (4): 1-6.  
Dang X B, Li H Y. Arctic offshore engineering modes and key technologies [J]. Petroleum Engineering Construction, 2016 (4): 1-6.