

北极深水钻井关键装备及发展展望

孙宝江

(中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580)

摘 要:随着国际常规油气资源日渐枯竭和国际油价的日益攀升,越来越多的国家和石油公司开始关注北极地区储量丰富的油气资源。我国的冷深海钻井技术尚处于探索阶段,了解北极深海钻井技术进展,对推动我国海洋油气钻井技术进步、保障能源供给安全具有重要的意义。北极深水油气勘探面临海洋环境恶劣、后勤保障困难、生态环境脆弱等难题,使北极深水油气勘探困难重重。通过大量文献调研和技术跟踪,概述了国外北极深水钻井关键装备的主要进展,并从极地破冰船、供给船、钻井船、钻井平台、海冰控制系统、低温钻机等方面,对北极深水油气钻探的关键装备进行了介绍,对北极深水钻井技术的发展趋势进行了分析,提出了一些探索性的观点和建议。

关键词:北极 深水钻井 钻井装备 发展趋势

中图分类号:TE52 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2013)03-0007-06

Progress and Prospect of Key Equipments for Arctic Deepwater Drilling

Sun Baojiang

(School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China)

Abstract: With the depletion of conventional oil and gas resources and the increase of oil prices, more and more countries and oil companies begin to pay attention to the Arctic area for its rich oil and gas resources. Cold deepwater drilling technology in China is now in the exploratory stage, it is very important to know the advancement in Arctic drilling, which can promote technological advancement in deepwater drilling and ensure the safety and security of energy supply in China. But it is very difficult to realize drilling in Arctic due to the harsh marine environment, a remote location with difficult logistics, and sensitive ecological environment. Through investigation and extensive review of literatures, this paper summarized the progress of key technologies and equipment in Arctic deepwater drilling, including icebreaker, store ship, drilling ship, drilling platform, ice management system and low temperature drilling rig, etc. Some tentative viewpoints and suggestions were proposed in Arctic deepwater drilling technologies.

Key words: Arctic; deepwater drilling; drilling equipment; development trend

2009 年美国地质调查局的调查资料显示,北极地区原油储量约 $120 \times 10^8 \text{ m}^3$ (800 亿桶),天然气储量 $47 \times 10^{14} \text{ m}^3$,分别占全球尚未开发石油和天然气储量的 13% 和 30%^[1]。据俄罗斯等国的调查资料,北极地区原油储量约为 $400 \times 10^8 \text{ m}^3$ (2 500 亿桶),相当于目前全球探明原油储量的 25%,天然气储量约为 $80 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占全球天然气储量的 41%。这些油气储量的 84% 都在海底,仅阿拉斯加海域油气储量就可能占总储量的 20%^[2]。

收稿日期:2013-04-23; **改回日期:**2013-05-17。

作者简介:孙宝江(1963—),男,山东高青人,1985 年毕业于华东石油学院钻井工程专业,1999 年获北京大学流体力学专业博士学位,教授,博士生导师,教育部长江学者特聘教授,主要从事海洋石油工程、油气井流体力学与工程领域的研究工作。

联系方式:(0532)86983017, sunbj1128@126.com。

基金项目:国家科技重大专项子课题“深水钻井水力学及井控关键技术”(编号:2011ZX05026-001-02)、教育部“长江学者和创新团队发展计划”项目“海洋油气井钻完井理论与工程”(编号:IRT1086)及中央高校基本科研业务费专项资金资助项目“海洋油气钻探中的安全保障基础问题研究”(编号:13CX05006A)联合资助。

在国际油价日益攀升、原油供给链条日显脆弱的今天,越来越多的国家和石油公司开始把目光投向北极地区。科学与工程技术的不断发展、北极冰川的不断消融,使北极油气开采变成可能,并逐渐成为油气勘探开发的热点。俄罗斯政府已经对北极地区油气资源开发工作进行了部署,荷兰皇家壳牌、英荷能源集团、埃克森美孚石油等国际能源公司,也纷纷游说各自政府,争取为北极油气开发提供资金、技术和政策支持。挪威国家石油公司 Statoil 与俄罗斯石油公司 Rosneft 签署合约,共同开发北极周围海域油气资源^[3]。埃克森美孚石油公司与俄罗斯石油公司达成协议,携手勘探北极圈边海喀拉海石油资源^[4]。

然而,由于北极地区气温低、暴风雪多、位置偏远、基础设施匮乏、缺乏海洋环境数据、生态环境敏感,使在该地区钻井困难重重^[5-6]。笔者通过调研大量文献,总结了北极深水钻井面临的挑战及关键技术,并分析了北极深水钻井技术的发展趋势,以期为我国深海钻井技术的发展提供借鉴。

1 北极深海油气钻探主要难题

相比于常规深水钻井,北极深水钻井面临的技术难题更多。例如,北极的海洋环境不同于低纬度地区的海洋环境,需要克服航线长、成本高的后勤保障,易破坏、难恢复的生态环境以及其他问题。

1.1 恶劣的海洋环境

北极气候寒冷,冬季始于十一月,历时半年之久,温度为 $-20\sim-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,八月份的平均气温最高也仅有 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[7]。所以,在北极进行钻井作业首先要做好防寒措施以保证人员的生命安全;其次,严寒会使钻井平台操作困难、钻机设备难以安全承载和正常运转、钻井管柱容易产生脆性破坏^[8-10]。

由于格陵兰岛、北美及欧亚大陆北部冬季的冷高压,北冰洋海域时常会出现猛烈的暴风雪^[7],北极冬季沿岸的平均风速达到 10 m/s 。这有可能引起钻井船的移位,导致隔水管发生变形和涡激振动,因此对其疲劳强度提出了更高的要求^[11]。

浮冰对钻井作业的时间及钻井平台的抗载强度有限制并提出了很高的要求,而且浮冰的影响范围很广,北极大部分海域的开放水域时间在很大程度上都受到浮冰的影响。北极地区海冰面积和范围均具有明显的季节变化,冬季平均海冰面积为夏季的2倍^[12],浮冰一般在六月中旬到七月上旬融化。在

夏季,钻井作业经常会因多年积冰而中断。新冰通常在十月开始形成,需要破冰船来辅助作业。据统计,北极地区全年可钻井时间有 $85\sim150\text{ d}$,平均作业时间为 100 d ,由于天气变化等的影响,有效作业时间又会缩短至约 87 d ^[13-14]。

1.2 艰难的后勤保障

北极地方偏远,人迹罕至,缺少基础设施。大型设备难以运输,后勤保障困难。后勤保障出现问题付出的代价将远高于其他任何地方,可能导致钻井工期大大延长甚至钻完井工程失败^[8]。钻井平台的甲板面积有限,进行重新补充的花费(租赁工具、管道、钻井液、水泥和备用部分)很大,该问题在冬季显得格外突出,因为与最近码头的距离也会非常远。因此,在比较偏远的 Beaufort 海域的大陆架上部署钻井船比部署半潜式钻井平台进行油气勘探更为有利^[15]。所以,北极深海钻井在进行钻井设计时必须高度重视后勤保障,充分认识其影响因素并制定相应的解决方案,以保证钻井作业的顺利完成。

1.3 脆弱的生态环境

低温条件下生态环境遭污染后恢复缓慢,加上北极地区高度季节性生态环境的影响,北极的生态环境极易因人类的油气勘探和开发活动而遭到破坏。尤其是原油泄漏对北极地区造成的危害巨大:一是北极地区海平面下存在冰山的海域,如泄露原油则清洁工作十分困难;二是原油泄漏可能会导致大量生物死亡,并对该地区的人口和生态环境造成长期污染,其影响甚至会持续数十年^[16]。

在墨西哥湾溢油事件发生后,深水钻井中溢油的应对方法开始成为一个十分受关注的问题。北极深海钻井中,传统的防原油泄漏技术(如建设防油栅),在厚实冰层中难以实现。风浪会将厚厚的浮油打散,油溅入碎冰块中与冰一起移动,给浮油定位与清洁带来困难^[17]。同时北极冬季缺少光照,气候严寒,石油也可能会被封存在海洋冰层里,这意味着泄漏的石油被环境稀释和降解需要经历更长时间。

1.4 其他问题

与其他海域一样,北极深海钻井也存在海底浅层欠压实、安全密度窗口窄、井壁不稳定、遇到浅层气易形成天然气水合物等一系列问题,如果不引起足够的重视,容易导致井壁坍塌、井漏等井下故障的发生。

由于气候和设备的限制, 北极海域油气勘探还处于初级阶段, 钻井液及水泥浆等需要适应北极寒冷的气候并满足由此带来的使用上的限制条件。据估计, 北极地区每桶原油的生产成本约为中东地区的十倍, 因而需要投入大量的资金, 并且北极深海钻井配套技术尚不完善^[1]。这导致北极地区的钻井作业面临更高的风险。

2 北极深海钻井关键装备

2.1 破冰船

破冰船是一种专门用于冰面上开辟航道的特种船舶。其主要特点是船体宽(纵向短, 横向宽)、船壳厚、功率大, 且船体各区域设有不同的压水舱, 动力多采用对称的多轴、多螺旋桨配置。破冰船是北极深水区域钻井作业的保障, 钻井过程中需要有破冰船破冰并且清除浮冰。目前, 全球破冰船队中, 功率超过 7 350 kW 的破冰船有 50 艘, 多数在波罗的海作业。俄罗斯拥有最大的破冰船队, 其中包括 7 艘核动力破冰船。芬兰、加拿大和瑞典各有 6~7 艘破冰船, 美国拥有 4 艘, 日本、德国、阿根廷、澳大利亚、挪威和荷兰各有 1~3 艘。俄罗斯和美国均拥有推进功率大于 22 000 kW 的破冰船^[18]。目前世界上最大的核动力破冰船是俄罗斯的“50 years of Victory”号, 该船推进系统采用 2 个核反应堆, 功率达到 55 125 kW; 船长 159 m, 宽 30 m; 吃水 11.08 m, 在无冰水域的最高航速为 21.4 kn, 排水量为 25 000 t; 该船的冰带宽度为 5 m, 采用不锈钢材料建造, 破冰能力可以达到 2.5 m^[19]。2012 年 3 月, 美国 Edison Chouest 海洋公司向 Shell 公司交付了新建的“M/V Aiviq”号北极破冰船, 船长 110 m, 额定最低作业温度 -40 °C, 可破碎厚 0.9 m 的海冰, 该船被部署在

阿拉斯加极地海域从事油气勘探活动^[5]。俄罗斯 Krylov 造船研究所计划建造北极钻井船, 该船可在北极风暴中航行, 破冰能力可达 1.5 m, 并可在北极地区独自作业长达 3 个月时间^[6]。中国目前的“雪龙”号极地科考船只相当于俄罗斯最高级的抗冰船, 还不是真正意义上的破冰船。

2.2 极地供给船

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。首先, 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的进行; 其次, 由于供给船要穿越冰区, 这就对供给船的抗载强度、破冰能力等性能提出了更高的要求。从公开发表的资料来看, 现有的极地供给船类型很少, 具有代表性的是 AARC(阿克伦北极技术公司)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, 具备初步的防火和救援能力, 为海洋结构物的安装提供救援和守护服务。该船具备较佳的破冰能力和冰区管理能力, 船尾破冰能力分别为 1.8 m/kn、1.6 m/3kn、0.9 m/7kn, 船首破冰能力分别为 1.2 m/3kn、0.6 m/8kn, 具备在厚度达 12 m 的碎冰环境中连续航行的能力。该船采用环保型设计, 船壳附近不设置油舱, 船员生活环境的舒适性和安全性好, 6 名船员均拥有独立单间, 7 个客舱最多可以容纳 12 人, 噪声和振动设计等方面均执行 DNV 标准^[19]。

2.3 海冰控制系统

在北极海域钻井, 钻井平台(钻井船)需要在温度低于 0 °C 的恶劣天气以及在浮冰和冰山的冲击下能保持其方位^[20], 因此, 通常应用海冰控制系统来控制其附近约 1.6 km 的冰川和冰山。图 1 为一个

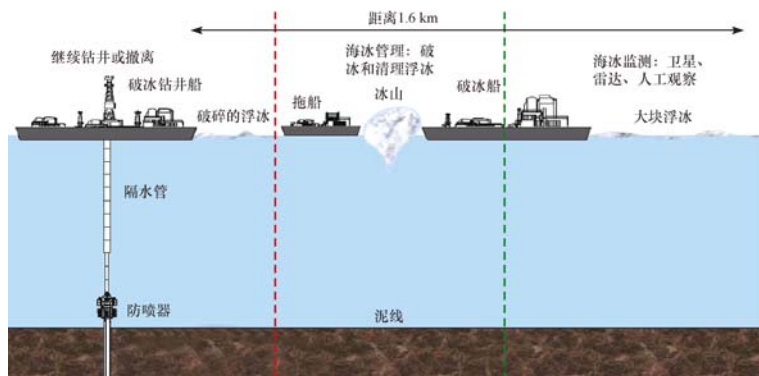


图 1 北极海域海冰控制解决方案

Fig. 1 Ice management and control scheme in Arctic Sea

整套的海冰控制系统^[15],在钻井平台上游 1.6~5.0 km 处布置 1~2 艘破冰船(具体是 1 艘还是 2 艘,根据海冰严重程度和工程大小确定)进行巡航,采用多种技术来监测海冰移动情况,包括人工观察、直升机勘测、机载雷达和卫星成像等。一旦发现海冰对钻井平台(钻井船)有威胁,1 艘破冰船便会破碎大块冰川;另 2 艘较小但灵活性强的破冰船及时破碎流向钻井平台(钻井船)方向的小冰川;如有必要可以使用一些较小船只拖曳冰山。这样,整套海冰控制系统就可以将浮冰对钻井平台(钻井船)的威胁降至最低。最后,如果冰情严重而难以控制,需断开隔水管与防喷器的连接,收回钻柱,迅速撤离。

2.4 极地钻井船和钻井平台

在选择北极海域钻井装置时,必须要尽可能地

将所有困难和极端环境参数考虑在内,最基本的参数是水深、海洋气象、环境条件和作业时间。其次,要充分考虑作业区域海冰的影响,比如主要的冰特征(岸冰,极地冰,冰山,浮冰)和冰的漂流速度。根据这些参数来选择钻井装置、海冰控制系统、定位系统、钻井装置组件,比如举升系统和水下设备、耐寒材料等,以确保钻井装置的可靠性和完整性^[15-21]。

图 2 为 3 类(分别标示为①、②和③)用于北极深海环境下的钻井装置:前 2 种是具有防冰装置的钻井船和半潜式钻井平台;后 1 种是概念设计,可全年工作的圆形钻井平台。在一般深水区域,半潜式钻井平台由于其稳定性好被广泛应用,而在有浮冰和冰脊存在的北极海域中,钻井船因为甲板承载能力大受到作业者的青睐。同时,由于船舶甲板面积大,供应成本低,使钻井船可以远离补给码头进行

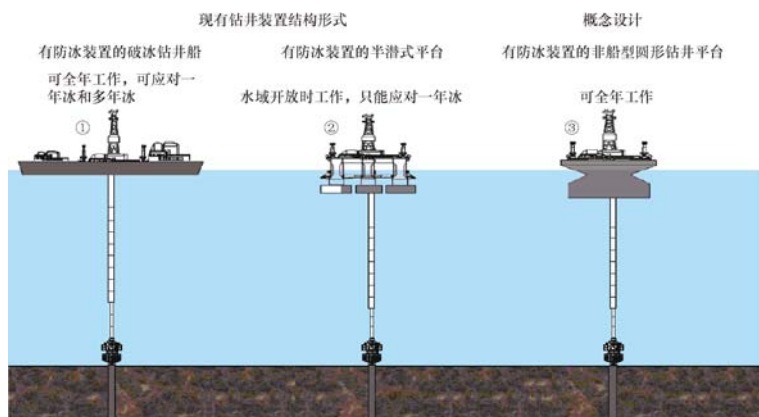


图 2 北极深水钻井装置特点比较

Fig. 2 Comparison of deep water drilling equipment for Arctic

作业。当然,钻井船的船体结构要能够携带大量燃料、设备、钻井液、备件,以保证自给自足。③号是圆形钻井平台,目前处于概念设计阶段,圆形的船体设计可提高抵抗冰荷载的能力,同时其内部空间还可用来储油。

世界上第一艘冰区超深水钻井船为韩国三星重工建造的“Stena DRILLMAX ICE”号,造价 11.5 亿美元,设计作业水深 3 000 m,最大钻井深度 10 000 m。该船长 228 m,宽 42 m,高 19 m,排水量 9.7×10^4 t,可以在 -40 °C 的温度、16 m 的海浪和 41 m/s 的海风环境下作业,配备动力定位系统,采用了双井架。GustoMSC 公司在 20 世纪 70 年代就开发了可以在冰区作业的“Pelican”级钻井船,该公司最近开发的“PRD 12000 冰区”型钻井船适合在北极航行和作业,满足 ICE-05 船级符号要求。新加坡吉宝船厂为 Frontier 钻井公司和壳牌公司总装的 2 艘“Bully”级钻井

船就采用了“PRD 12 000 冰区”型设计方案,首艘船“Bully 1”号于 2010 年交付。此外,大宇造船与海洋工程公司目前正在开发能够在北极作业的钻井船。该船采用球鼻艏设计,适合在无冰水域和薄冰区域航行;船尾采用加强结构,以适于厚冰区域操作。该船安装有 2 个 Azipod 装置和 4 个可收缩方位推进器,以提高船舶操作和动力定位能力。该船的作业环境为 0.5~1.5 m 厚冰区,在薄冰区域的穿透度为 90% 以上,在厚冰区域的穿透度为 50%^[19]。

2.5 极地低温钻机

低温钻机是一种能在极低温度环境下工作的钻机,与常规钻机相同,低温钻机也是由井架、底座、动力系统、传动系统、起升系统、循环系统以及液、气、电控制系统等组成的,除通用的外购件外,其余部件如井架、底座、起升系统和传动系统等,主要用金属

材料制造而成,主要包括铸钢件、结构件和轴类件^[22]。由于北极地处高纬度,气候严寒,因此钻机在布局时应尽可能减少热量损失,采用集中供热,对于需要保温的装置紧密布置,以减少热量损失。选择钻机材料时要能保证钻机在低温环境下的工作,同时为了降低成本,露天工作的设备,如井架、底座和天车等,采用耐低温材料;有保温措施的部件,如后台、固控等采用常用材料;钻机搬迁、安装拆卸过程中由于吊装和井架起升中受力较大的部件采用低温材料。研究表明,Q345E 级钢在常温、0℃和-20℃温度下的纵向冲击功均超过 60 J,-40℃以下的冲击功不低于 40 J,冷脆转化温度不低于-60℃,其力学性能、化学成分等完全满足前苏联国家标准推荐的井架用 C345 钢的性能要求。因此,对于井架的主要部件选用 Q345E 钢^[23]。我国南阳二机集团作为研制石油钻采装备的骨干企业,在国内率先进行了低温材料的研制和应用,2005 年以来该公司先后研制出能够满足-45℃高寒地区钻井作业要求的 1 000~5 000 m 系列低温钻机,产品批量出口俄罗斯和加拿大等国^[24]。

3 北极深海钻探工程进展

作为全球最大的能源企业之一,壳牌公司一直在努力推动北极海域的石油钻探工作。截至 2012 年,壳牌公司在北极海上的钻探作业已经进行了 7 年并耗资 40 多亿美元,还要面对阿拉斯加土著人的反对、环保团体的抗议以及墨西哥湾漏油事件带来的巨大压力。2012 年 7 月初,壳牌公司的“Kulluk”钻井船驶向阿拉斯加北极地区,计划在 Beaufort 海的一个海域(距离阿拉斯加州海岸大约 32 km)钻 2 口探井,在 Chukchi 海的一个海域(距离阿拉斯加州海岸大约 112 km)钻 3 口探井。其主要目的是对这 2 个区域做进一步的勘探和研究,而不是开采石油^[25]。2013 年 1 月 1 号,该钻井船在拖航中遭遇风暴,船体和设备受到损坏,不得不返回船坞整修。2013 年 2 月 12 日,壳牌公司宣布暂停北极石油勘探钻井活动^[26]。

4 发展趋势与展望

北极的环境特点是气候严寒,冰层厚,可钻井时间短(每年只有三四个月时间),油气钻探的主要瓶

颈是装备系统。研究分析认为,北极钻井装备的发展趋势主要有:1)基于装备运行和人员安全考虑,船载钻井装备及操作区趋向于采用全封闭设计;2)基于最大限度降低北极海域流冰对钻井装备带来的风险,钻井船和隔水管系统需有较强的抵抗暴风雪和冰荷载的能力;3)基于自动化安全控制和运输及模块化装备高效安装考虑,钻井装备趋于采用轻质耐低温的新型材料制造;4)基于延长每年在北极的作业期和增加冰期的活动能力考虑,需研发破冰能力强的钻井破冰船和供给船;5)为了降低恶劣环境的影响,海底钻机的研制与应用也可能是北极海水钻井的发展方向。

我国的石油消费位居世界前列,进口依赖程度达到 50%以上,因此,北极油气资源对我国的重要意义不言而喻。所以我国应重视跟踪北极地区油气勘探开发进展,加强抗冰船舶的设计和研发力度,研究冰区航行和作业经验,为在北极海域进行油气勘探做好准备。我国石油企业应寻求与世界大型石油公司的合作机会,通过注资、技术入股、设备出口等方式积极参与北极油气资源的勘探开发。

随着新材料、制造技术、网络通讯和气象科学技术的不断发展,及钻井作业的机械化、自动化和信息化程度不断提高,钻机作业将实现完全自动化,钻井效率与成功率极大提高,并将恶劣气候对钻井作业的不利影响降至最低,从而逐步提高北极深海钻探生产的安全性。北极深海的石油天然气开采一定在不远的将来成为可能。

参 考 文 献

References

- [1] 冯丹,陆朝荣,周山丹. 北极石油开发的争夺与障碍[J]. 节能技术,2009,27(4):355-357.
Feng Dan, Lu Chaorong, Zhou Shandan. Petroleum exploitation in the Arctic Region: competition and obstacles[J]. Energy Conservation Technology, 2009, 27(4): 355-357.
- [2] 白振瑞,李明岩,杨国丰. 北极地区油气资源潜力和勘探开发动向[J]. 当代石油石化,2011,19(9):39-44.
Bai Zhenrui, Li Mingyan, Yang Guofeng. Potential of oil and gas resources and exploitation trend in Arctic Area[J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2011, 19(9): 39-44.
- [3] 国际能源网. 挪威与俄罗斯合作勘探北极石油资源[EB/OL]. [2013-03-20]. http://www.in-en.com/article/html/energy_08450845701396968.html.
International Energy. Norway and America cooperate to explore oil resources in Arctic[EB/OL]. [2013-03-20]. http://www.in-en.com/article/html/energy_08450845701396968.html.

- [4] 国际能源网. 美俄合作勘探北极圈海域石油[EB/OL]. [2013-03-20]. http://www.in-en.com/article/html/energy_08170817421570558.html.
International Energy. Russia and America cooperate to explore oil resources in sea area of Arctic Circle[EB/OL]. [2013-03-20]. http://www.in-en.com/article/html/energy_08170817421570558.html.
- [5] 孙琦, 纪国栋, 汪海阁, 等. 极地钻井装备现状及发展趋势浅析[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(6): 43-46.
Sun Qi, Ji Guodong, Wang Haige, et al. Status and development trend of Arctic drilling equipment[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(6): 43-46.
- [6] 中国海洋工程网. 俄罗斯 Krylov 将建造破冰厚度 1.5 米北极钻井船[EB/OL]. [2013-03-20]. <http://www.21offshore.com/news/d697256.html>.
China Ocean Industry. Russian Krylov will build an Arctic drilling ship which can break one meter and a half height ice[EB/OL]. [2013-03-20]. <http://www.21offshore.com/news/d697256.html>.
- [7] 中国数字科技馆. 北极的气候[EB/OL]. [2013-03-20]. <http://amuseum.cdsm.cn/AMuseum/kexuekaocha/kksd/bj/bjgk/bjwz/abc109.html>.
China Digital Science and Technology Museum. Climate of Arctic[EB/OL]. [2013-03-20]. <http://amuseum.cdsm.cn/AMuseum/kexuekaocha/kksd/bj/bjgk/bjwz/abc109.html>.
- [8] Hamilton Jed M. The challenges of deep water Arctic development[R]. ISOPE 11-21-4-241, 2011.
- [9] 王福贵, 贾秉彦, 周忠祥. 基于低温钻机管汇应用的电伴热系统设计[J]. 天然气与石油, 2011, 29(3): 76-78.
Wang Fugui, Jia Bingyan, Zhou Zhongxiang. Design of electrical heat tracing system based on low temperature drilling rig manifold[J]. Natural Gas and Oil, 2011, 29(3): 76-78.
- [10] Gulick, Jonathan F. Transportation requirements for drilling operations on the Arctic North Slope of Alaska[R]. SPE 10755, 1983.
- [11] 孙宝江, 曹式敬, 李昊, 等. 深水钻井技术装备现状及发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(2): 8-15.
Sun Baojiang, Cao Shijing, Li Hao, et al. Status and development trend of deepwater drilling technology and equipment[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(2): 8-15.
- [12] 魏立新. 北极海冰变化及其气候效应研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
Wei Lixin. Study on the variation of Arctic sea ice and its effect on global climate[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [13] Jahns H O. Arctic drilling systems[R]. WPC 20204, 1983.
- [14] Hippman A, Kelly W. The single steel drilling caisson: a new Arctic drilling unit[R]. SPE 12000, 1985.
- [15] Pilisi N, Maes M, Lewis D B. Deepwater drilling for Arctic oil and gas resources development: a conceptual study in the Beaufort Sea[R]. OTC 22092, 2011.
- [16] 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.
Li Haowu, Tong Xiaoguang. Exploration potential analysis of oil and gas resource in Arctic Regions[J]. China Petroleum Exploration, 2010, 15(3): 73-82.
- [17] Skeie G M, Bjørnbom E, Thorbjørnsen S, et al. High resolution oil spill response planning for operations in a sensitive Arctic environment, sharing information between operators, national authorities, local oil spill response groups and the general public[R]. SPE 98593, 2006.
- [18] 沈权, 赵炎平. 破冰船技术及几种破冰方法[J]. 航海技术, 2010(1): 5-7.
Shen Quan, Zhao Yanping. Icebreaker technology and several ice-breaking ways[J]. Marine Technology, 2010(1): 5-7.
- [19] 中船集团第七〇八所. 冰区船舶靓丽风景线[EB/OL]. [2013-03-20]. <http://www.shipol.com.cn/jszl/lwbg/157381.htm>.
CSSC 708th Institution. Ship in zone of ice forming remarkable scenery line[EB/OL]. [2013-03-20]. <http://www.shipol.com.cn/jszl/lwbg/157381.htm>.
- [20] Rajiv Aggarwal, Richard D'Souza. Deepwater Arctic: technical challenges and solutions[R]. OTC 22155, 2011.
- [21] Thomas Kipker, Bentec GmbH. Drilling rigs in Arctic deep temperature environments: design an operation challenges[R]. OTC 22093, 2011.
- [22] 汪金桃. 低温钻机金属材料性能与工艺研究[J]. 石油机械, 2008, 36(9): 117-120.
Wang Jintao. Research of metal material of drilling with regard to ability and technology in low temperature[J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(9): 117-120.
- [23] 张东涛, 秦晓峰, 廖昌建, 等. ZJ50/3150DB 型低温石油钻机设计[J]. 石油矿场机械, 2009, 38(9): 84-87.
Zhang Dongtao, Qin Xiaofeng, Liao Changjian, et al. Design of ZJ50/3150DB drilling rig low temperature region[J]. Oil Field Equipment, 2009, 38(9): 84-87.
- [24] 崔玉平. 国内首台 7000 米低温钻机研制成功[EB/OL]. [2013-03-20]. <http://www.cinn.cn/xw/xcpjxs/156905.shtml>.
Cui Yuping. The first domestic 7000 meter drilling rig was developed in low temperature[EB/OL]. [2013-03-20]. <http://www.cinn.cn/xw/xcpjxs/156905.shtml>.
- [25] 赵纪东. 壳牌公司有望第一个实现北极钻探[N]. 科学研究动态监测快报, 2012-08-01(15).
Zhao Jidong. Shell company is likely to be the first one to accomplish Arctic drilling [N]. Letter of Scientific Research of Dynamics Monitor, 2012-08-01(15).
- [26] Tom Fowler. Shell may cancel second summer of Arctic drilling due to rig damages[EB/OL]. [2013-03-20]. http://www.worldoil.com/Challenges_may_threaten_Shell_drilling_in_Arctic.html.

[编辑 陈会年]