



中国石化极地冷海钻井技术研究进展与发展建议

路保平 侯绪田 柯珂

Achievements and Developing Suggestions of Sinopec's Drilling Technologies in Arctic Sea

LU Baoping, HOU Xutian, KE Ke

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021046>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国石化重点探区钻井完井技术新进展与发展建议

New Progress and Development Suggestions for Drilling and Completion Technologies in Sinopec Key Exploration Areas

石油钻探技术. 2020, 48(4): 11–20 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020069>

极地冷海钻井技术挑战及关键技术

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

石油钻探技术. 2017, 45(5): 1–7 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201705001>

中国石化海外油气田钻井完井技术现状与发展建议

Drilling Completion Technologies of Sinopec Overseas Oilfields: Status Quo of Technology Development Suggestions

石油钻探技术. 2018, 46(5): 1–7 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018128>

中国石化石油工程技术新进展与发展建议

New Progress and Development Proposals of Sinopec's Petroleum Engineering Technologies

石油钻探技术. 2021, 49(1): 1–10 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021001>

胜利油田钻井完井技术新进展及发展建议

The Latest Progress and Suggestions of Drilling and Completion Techniques in the Shengli Oilfield

石油钻探技术. 2017, 45(1): 1–9 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201701001>

中国石化页岩气工程技术新进展与发展展望

New Progress and Development Prospect in Shale Gas Engineering Technologies of Sinopec

石油钻探技术. 2018, 46(1): 1–9 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018001>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀专家视点▶

doi:10.11911/syztjs.2021046

引用格式: 路保平, 侯绪田, 柯珂. 中国石化极地冷海钻井技术研究进展与发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(3): 1-10.

LU Baoping, HOU Xutian, KE Ke. Achievements of and developing suggestions of Sinopec's drilling technologies in Arctic sea [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(3): 1-10.

中国石化极地冷海钻井技术研究进展与发展建议

路保平, 侯绪田, 柯 珂

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 102206)

摘 要: 北极油气资源丰富, 但其低温、浅层灾害、冻土层、井筒处于大温变条件等地质、环境因素给钻井作业带来诸多挑战, 为此, 在“十三五”期间, 中国石化以钻井安全环保高效为总目标, 以解决钻井装备及工具、钻井工艺及措施、井筒工作流体的“冷”适应性问题为核心, 进行了钻井灾害风险评价控制与环保、钻井关键装备及工具、钻井工艺与井筒工作液等关键技术研究, 在浅层气、天然气水合物灾害地层的定量风险评价方法、-50℃低温轨道钻机及钻井工具、冻土层井壁稳定性评价与控制技术、低温钻井液与固井水泥浆等工程技术方面取得了重要进展, 初步形成了极地冷海钻井关键技术体系。随着北极油气开发, 陆地上将进入更高纬度、更厚永冻层区域, 海洋上将向更深水域、常年冰或更厚浮冰海域进军, 极地冷海钻井将面临更大的挑战, 需要进一步完善极地冷海钻井完井技术理论与方法, 研制新型钻井完井关键装备与工具, 形成较为完善的极地冷海钻井完井技术体系, 以满足北极地区油气藏高效勘探开发的需求, 提升我国石油公司在极地油气合作项目中的经济效益和核心竞争力。

关键词: 极地冷海; 钻井; 灾害评价; 极地钻机; 低温工作液; 技术进展; 发展建议; 中国石化

中图分类号: TE249

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2021)03-0001-10

Achievements and Developing Suggestions of Sinopec's Drilling Technologies in Arctic Sea

LU Baoping, HOU Xutian, KE Ke

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 102206, China)

Abstract: The Arctic area is rich in oil and gas resources. However, its geological and environmental factors such as low temperature, shallow hazards, permafrost and extreme temperature change in wellbore bring many challenges to drilling operation. For this reason, during the "Thirteenth Five-Year Plan" period, Sinopec took safety, environmental protection and efficient drilling as its overall goals and focused on solving the problem of "cold" adaptability of drilling equipments and tools, drilling technologies and measures, wellbore working fluids. Research was performed on key technologies regarding drilling hazard assessment and control, environmental protection, key drilling equipments and tools, drilling techniques, wellbore working fluids, etc. Impressive progresses were made in the quantitative risk assessment method for hazards to shallow gas and gas hydrate formations, the orbital drilling rigs and tools utilized at -50℃, stability evaluation and borehole stability control in permafrost, and engineering technologies related to drilling fluid and cement slurry under low temperature conditions. As a result, the key technology system of drilling in the Arctic sea was preliminarily developed. As the Arctic oil and gas development enters higher latitudes and thicker permafrost regions on land, and the oceans will advance to deeper waters, perennial ice or thicker ice floes, drilling in Arctic sea will face greater challenges and requires further progress. Therefore, it is necessary to build a complete drilling and completion technology system in the Arctic sea by improving the theories and methods and developing new key equipments and tools. With the system, the demands of efficient exploration and development of oil and gas reservoirs in the Arctic region can be realized, thereby enhancing the economic benefits and core competitiveness of China's oil companies in international cooperation projects of oil and gas development in this area.

Key words: Arctic sea; drilling; hazard assessment; Arctic drill rig; low-temperature working fluid; technical progress; developing suggestions; Sinopec

收稿日期: 2021-03-04。

作者简介: 路保平 (1962—), 男, 河北临城人, 1982年毕业于华东石油学院钻井工程专业, 2001年获石油大学 (北京) 油气井工程专业工学博士学位, 正高级工程师, 国家有突出贡献中青年专家, 主要从事石油工程技术研究及相关管理工作。系本刊编委会主任。E-mail: lubp.sripe@sinopec.com。

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: 2016YFC0303300) 部分研究内容。

北极地区蕴藏着丰富的油气资源,约储存有全球30%的天然气和13%的石油^[1-3]。目前,我国油气资源对外依存度已逼近70%,在有效保护生态环境的前提下积极参与北极油气和矿产资源的开发,对我国油气资源战略安全和“一带一路”建设具有重要意义。2018年1月26日,中国政府发布了《中国的北极政策》白皮书,将各方共建冰上丝绸之路作为中国针对北极地区开发的重要构想,这标志着从油气合作到拓展“一带一路”建设,中国全面开启了在北极区域的国际合作^[4]。中国石化在“十一五”和“十二五”期间积极参与萨哈林冷海油气合作项目,独立完成了南阿什1井等7口井的钻井施工,初步形成了适用于亚北极冷海区域的优快钻井配套技术、冷海井控关键技术、低温钻井液技术、快凝固井水泥浆技术、钻井完井环保技术等冷海钻井关键技术^[5-8]。2015年,中国石化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》,并开展了相关油气合作项目^[9],钻井作业逐渐进入北极圈以内,作业环境与地质条件更为恶劣复杂,环保要求更为严苛,施工难度更大。

为了降低极地冷海钻井作业风险与成本,“十三五”期间,中国石化以解决极低温及大温变条件下固体、流体和地层特性及其变化机制这一重要科学问题,以及钻井设备、钻井工具、钻井工艺、井筒工作流体的“冷”适应性问题为核心,围绕钻井灾害风险评估控制与环保技术、低温钻机设计与关键工具研制、钻井工艺与井筒工作液等关键技术开展探索研究,在极地浅层地质灾害定量风险评估技术、-50℃低温轨道钻机及钻井工具、冻土层井壁稳定性评价与控制技术、低温管柱强度校核与设计技术、低温钻井液与固井水泥浆等关键工作液体系等工程技术取得了重大进展,初步形成了极地冷海钻井关键技术体系,为解决北极冷海油气勘探开发难题奠定了坚实的基础。

1 极地冷海钻井挑战和技术现状

1.1 极地冷海钻井面临的挑战

北极地区自然条件恶劣,地质条件复杂,生态环境极其脆弱,油气勘探开发面临着路途遥远、环保要求严苛、极低温、冰山、极夜、浮冰、强风暴雪、永久冻土层、地震频发和深水环境等多项挑战^[10-15]。

1) 极度严寒、强风暴雪和巨厚浮冰会对人身安全造成极大风险、对钻井装备的性能要求高,且作业窗口短。北极地区气候寒冷,最低可达-70℃,对

人员生命安全、钻井装备及配套设备安全运载都提出了严峻考验,特别是暴风雪、急速季风和浮冰,对钻井平台结构和立管系统的抗载强度提出了更高要求。另外,北极地区冬长夏短,作业时间窗口有限,全年平均可进行钻井作业的时间不到90d,这对钻井作业的组织安排要求很高。

2) 地质条件复杂,永久冻土、天然气水合物、浅层气广泛分布,钻井过程中易发生井下故障,安全高效钻井面临严重挑战。极地冻土层厚达千米,天然气水合物和浅层气赋存,钻井过程中极易出现冻土融化和天然气水合物分解,造成井壁坍塌和井口下沉,井控和井筒安全面临很大挑战。冷海浅部地层欠压实,承载力低,安全密度窗口窄,钻井过程中易发生井眼失稳、井漏等井下故障。受环境、气候和设备的限制,作业时效低,资金投入大,钻井成本非常高。

3) 环境条件恶劣,路途遥远、基础设施匮乏,后勤保障难度大。北极区域地处偏远,人迹罕至,缺少基础设施,不具备钻井设备、工具和生活材料供给、储备条件,大型设备和生活物资运输艰难,使后勤保障成本高、风险大,易导致钻井周期大幅延长、钻井失败甚至危及人员生命安全。

4) 环境脆弱,生态敏感,环保要求严苛。北极地区环境脆弱,承载能力低,生态系统敏感,油气勘探开发作业及其潜在的原油泄漏极易造成生态永久性破坏,危害巨大。周边国家和国际组织高度重视北极地区环境安全,环保要求严苛,钻井完井作业“零”排放的成本非常高。

5) 钻井完井新技术、新工具的现场试验难度大。目前,我国在北极地区没有油气田区块,也没有能够开展现场试验新技术新工具的油气田开发项目;虽然有相关的中俄油气合作项目,但由于我国极地油气开发技术的竞争力不强,大部分项目并不是作业者,缺乏话语权,因而很难将自主研发的新技术、新工具纳入油气井工程设计方案,导致现场试验难度较大,不利于我国极地冷海钻井完井技术的快速发展。

1.2 极地冷海钻井技术现状

目前,西方发达国家经过多年的技术沉淀,已经在极地冷海油气勘探开发方面积累了较为丰富的经验,按照极地油气区块作业环境分类,在陆地、滩浅海、浅水及中深水等作业领域分别具备了以下能力:1) 具备了-50℃温度下陆地油气勘探、钻井完井及生产能力;2) 具备了滩浅海(水深<30m)、常年冰(浮冰厚度1.5m)及冰脊等较重冰情条件下的钻井完井及生产能力;3) 具备了-20℃温度下浅水至

中深水海域($30\text{ m} \leq \text{水深} < 1500\text{ m}$)、无冰或少冰等较轻冰情条件下的钻井完井和生产能力;4)形成了人工岛+海底管道、混凝土重力式平台+穿梭油轮、导管架平台+海底管道、海油陆采(大位移井的最大水平位移已达 $12\,130\text{ m}$)、海上浮式生产泄油装置(FPSO)+水下系统、浮式平台+海底管道和水下生产系统+陆上终端等7种开发模式^[16-17]。

我国极寒条件下钻井完井技术研究、装备研发起步较晚,目前已具备了一定的极寒陆地、滩浅海、浅水钻井完井能力:1)具备 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度条件下陆地井深 $8\,000\text{ m}$ 油气井钻井完井能力,钻遇冻土层厚度 $<3\text{ m}$,无永久性冻土层钻进井例;2)具备 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度、无冰条件下浅水(水深 $<100\text{ m}$)井深 $7\,000\text{ m}$ 油气井钻井完井能力。通过多年的技术攻关,初步形成了“三浅”灾害风险评价与控制技术和以地震解释剖面+层速度相结合的“三浅”灾害风险定量预测方法,研制了深水低温钻井液体系($4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的表观黏度比小于2,泥页岩滚动回收率大于90%,能有效抑制天然气水物生成)及深水低温早强水泥浆体系($4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下8 h抗压强度 $\geq 3.5\text{ MPa}$)。

1.3 极地冷海钻井需要解决的关键技术问题

1)极地冷海钻井作业环境风险因素的准确识别、风险的科学评价与灾害的有效控制问题^[18]。极地冷海钻井面临着恶劣气象条件、冻土层、浅层地质灾害(浅层气与天然气水合物地层)等典型作业环境风险因素,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^[19]。因此,对这些风险因素进行准确识别,并对由此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,规避灾害性事故的发生,是实现极地冷海安全钻井的前提和基础。

2)适用于低温条件下的钻井关键装备及工具的设计与研制问题。与常温相比,钻井关键装备及工具的材料特性在低温条件下有明显变化,例如部分材料脆性增强、强度降低、密封失效等,从而易导致设备及工具损坏失效、钻井作业中断,不但会造成井下故障的发生,而且使钻井成本大幅增加^[20-22]。因此,对适用于低温环境($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$)的钻井关键装备及工具的设计与制造技术开展研究,研发或优选适应极寒条件的特殊材料,优化密封、润滑形式,研制适用于低温环境的新型钻井工具,提升钻井关键装备及工具的可靠性和稳定性,为安全高效钻井奠定坚实的硬件基础。

3)钻井工艺与井筒工作液在低温-高温条件下的适应性问题。北极地区大陆冻土层平均厚度为 $400\sim 900\text{ m}$,最厚达 $1\,400\text{ m}$,而北极海域从海面至

泥线水体温度为 $-4\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此,极地冷海钻井时上部井筒处于低温环境中(约 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$),这对钻井液、水泥浆性能造成较大影响,也使井筒温度压力分布与常规井筒有较大区别,需要对现有钻井参数优化设计方法进行改进。随着井深增加,地层温度逐渐升高,井筒流体与地层、管柱持续热交换,使上部井眼中井筒流体温度不断升高,导致上部地层中的孔隙流体融化,改变其岩土、岩石力学性能,极易发生井眼失稳问题^[23-26];同时,还会导致管柱与地层、管柱与管柱环空间的流体受热膨胀,产生环空带压现象,致使管柱失效。因此,解决好钻井工艺与井筒工作液在低温-高温条件下的适应性问题,对减少井下故障、提高作业效率、实现高效钻井至关重要。

2 主要技术进展

在已有极地冷海钻井研究成果的基础上,“十三五”期间,中国石化石油工程技术研究院牵头,联合中国石化石油机械股份有限公司、中国石油大学(北京)、中国石油大学(华东)等单位共同开展了国家重点研发计划项目“极地冷海钻井关键技术研究”,在浅层灾害定量风险评价、低温钻机设计与制造、冻土层井壁稳定性评价、安全钻井液密度窗口与温度窗口的确定方法、极地海油陆采万米大位移井钻井设计、低温防冻型钻井液和低温早强水泥浆体系等工程技术方面均取得了重要进展,为我国形成极地冷海钻井技术体系和提高北极油气钻井作业能力奠定了良好基础。

2.1 浅层灾害定量风险评价技术

针对极地冷海地区广泛分布的浅层气和天然气水合物,基于声学及沉积学基础理论,建立了浅层气和天然气水合物地层纵波速度与孔隙度、密度、颗粒骨架结构、含气(水)量、天然气水合物饱和度的关系数学模型^[27]。针对浅层气、天然气水合物的赋存条件,建立了国内首个能够模拟 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 20 MPa 作业环境的浅层地质灾害声波特征识别模拟试验装置(见图1),并以此为基础形成了制备模拟地层和测量系列声学参数的方法。依据目标区域实际地层土质、岩性特征,通过室内试验,建立了浅层气和天然气水合物风险定量预测图版(见图2),结合地球物理解释资料可以评价浅层气压力及天然气水合物饱和度范围,定量预测浅层地质灾害的发生概率,明确浅层地质灾害的严重级别,并据此制定了浅层地质灾害级别的评价标准、控制方法和作业措施。

该方法在北极亚马尔、亚北极萨哈林等区块的10余口井中成功应用,浅层气压力的预测精度达到90%以上,天然气水合物饱和度的预测精度达到85%以上^[28]。

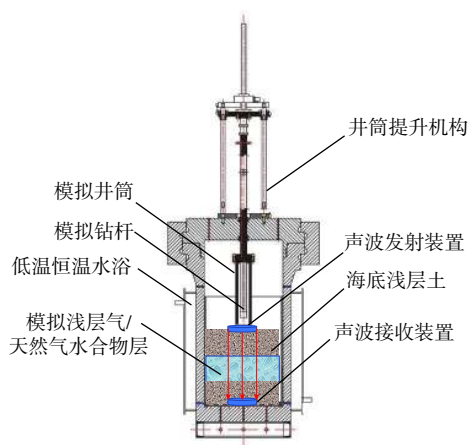


图1 浅层地质灾害声波特征识别模拟试验装置

Fig.1 Simulation system for the acoustic identification of shallow hazards

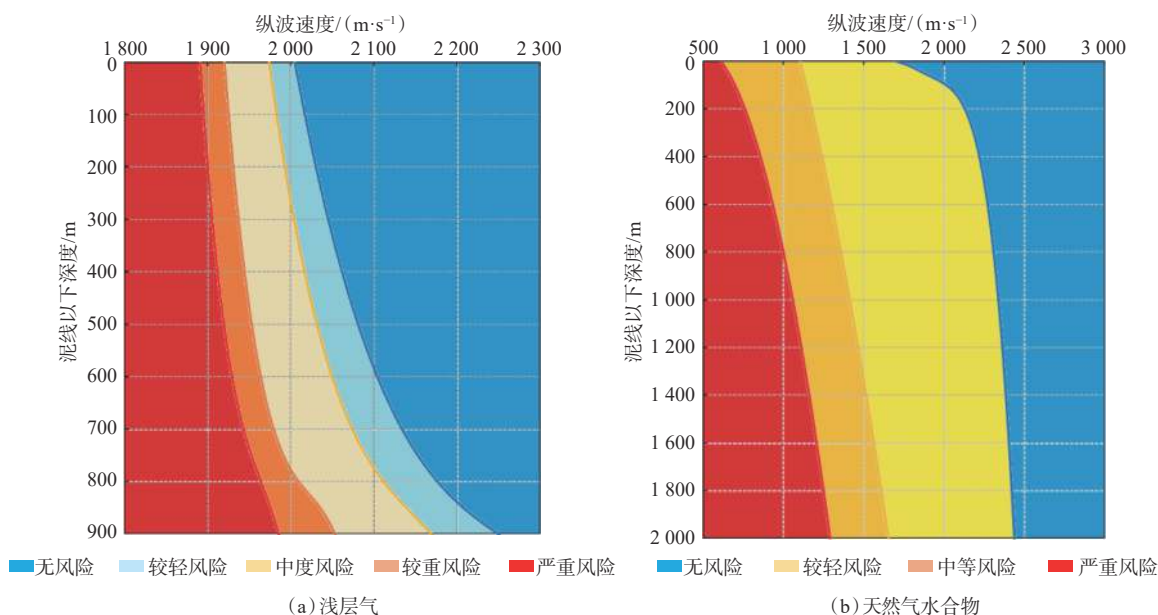


图2 浅层气与天然气水合物风险定量预测图版

Fig.2 Shallow gas and gas hydrate risk quantitative prediction chart

针对焊接过程中焊接参数对金属材料低温韧性的影响问题,开展了不同焊接参数条件下焊接接头的组织和性能研究,采用焊接热模拟方法,绘制了低温条件下结构件材料的热循环连续冷却曲线,优选合理的热输入值并确定合适的焊接工艺参数。使用优选的焊接参数焊接 Q345E 钢板,并对焊接部位进行强度测试和低温冲击试验,结果满足设计和标准要求。

2.2 低温钻机设计与制造技术

1) 针对低温环境下金属材料脆性增强的问题,开展了结构件和轴类零件的金属材料低温性能研究和热处理工艺研究。在国家标准《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—2008)中包含的合金钢材料中,选取低温韧性较好的 Q345E 钢,对不同规格、不同批次的 Q345E 钢板进行 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下的低温冲击试验(结果见表1),并对冲击功较高的 Q345E 钢进行了化学成分统计分析,结果表明, Q345E 钢材料的硫、磷含量小于 0.010%,低温冲击功符合设计和标准要求^[29]。通过评价几种轴类零件常用合金钢的低温韧性,选用 40CrNiMo 合金钢作为制作极地钻机轴类零件的材料。采用多种热处理工艺对 40CrNiMo 合金钢进行处理后,再在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下进行冲击试验(结果见表2),结果表明: 40CrNiMo 合金钢经过 2~5 号热处理工艺处理后,其强度和低温韧性均能满足设计要求,综合考虑抗拉强度、屈服强度、延伸率和冲击功, 3 号热处理工艺最优。

2) 针对极地大风、低温等恶劣环境条件及油气井大位移、丛式井等作业要求,开展了钻机总体布局、关键部件及系统低温适应性、热平衡分析等研究,完成了塔形井架、箱叠式底座、四电机双减速箱驱动绞车等关键部件的设计方案和热平衡分析,形成了在双排导轨上滑移、分层布置、加热保温的钻机整体设计方案,具有整体滑移、可丛式井作业、抗风雪稳定性强的特点。

表 1 不同规格 Q345E 钢板-50 ℃ 下的冲击试验结果

Table 1 Impact test results of Q345E steel plates with different specifications at -50 ℃

序号	材料	冲击功/J			结果
1	Q345E/-16	277	279	287	合格
2	Q345E/-20	88	74	82	合格
3	Q345E/-36	248	231	209	合格
4	Q345E/-40	346	21	57	合格
5	Q345E/-45	40	25	38	合格
6	Q345E/200X160X16	95	86	80	合格
7	Q345E/160X120X12	171	134	158	合格
GB/T 1591—2008和API 4F 标准的参考值		平均值27 J, 单个值20 J			

表 2 40CrNiMo 合金钢采用不同热处理工艺后的低温冲击试验结果

Table 2 Low-temperature impact test results of 40CrNiMo alloy steel treated with different heat treatment processes

序号	材料	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率, %	冲击功/J	热处理工艺
1	40CrNiMo	1052	886	13	26	A ℃ 淬火+560 ℃ 回火
2	40CrNiMo	1010	868	14	35	B ℃ 淬火+585 ℃ 回火
3	40CrNiMo	980	850	13	40	A ℃ 淬火+600 ℃ 回火
4	40CrNiMo	945	760	13	51	B ℃ 淬火+620 ℃ 回火
5	40CrNiMo	968	770	13	56	C ℃ 淬火+635 ℃ 回火
API 8C标准的参考值		≥820	≥758	≥12	≥27	—

2.3 低温钻头及钻具的研制

1) 针对极寒地区恶劣钻井条件, 完成了极地钻井钻头设计。通过室内试验确定了镍含量、宏晶碳化钨和铸造碳化钨混合粉、烧结碳化钨和铸造碳化钨混合粉对钻头胎体性能的影响, 确定了 10% 镍+烧结碳化钨与铸造碳化钨混合粉+铜镍锰锌粘结金属的金刚石钻头基体材料配方。通过研究粘结金属和胎体粉性能, 优选了 90% 121 粉+10% 结晶 W 粉+JZ-2 粘结金属的孕镶金刚石钻头基体材料配方, 并优选了金刚石钻头钢材、组焊和钎焊焊材。同时, 研究形成了轮廓线、力平衡和防回旋、自动调节切削深度、侧向移动调节和穿夹层设计等技术, 针对不同需求^[30], 完成了金刚石钻头、孕镶金刚石钻头和取心金刚石钻头的设计。

2) 研制了极地钻井井下动力工具。通过研究螺杆钻具橡胶材料的增塑体系、生胶体系、硫化体系和

防老化体系, 开发了一种高性能定子橡胶配方, 解决了螺杆钻具在-50 ℃ 下存储和 180 ℃ 下使用的问题, 其力学性能变化率小于 4%。攻克了螺杆钻具防掉杆和传动轴防掉设计技术(见 图 3), 提高了螺杆钻具在深井使用的安全性。形成了涡轮钻具解卡和防掉工具、PDC 轴承、高性能动环盘和静环盘结构等技术(见 图 4), 提高了涡轮钻具的动力性能和安全性能。

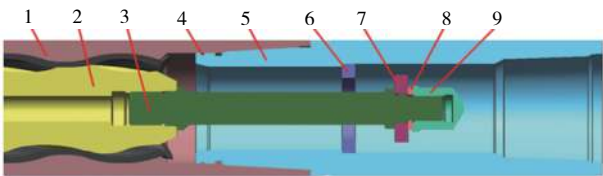


图 3 螺杆钻具的基本结构

Fig.3 Basic structure of the PDM (Positive Displacement Motor)

1. 定子; 2. 转子; 3. 防掉杆; 4. O 形密封圈; 5. 防掉接头;
6. 防掉档盘; 7. 防掉垫圈; 8. 防松垫片; 9. 防掉螺母

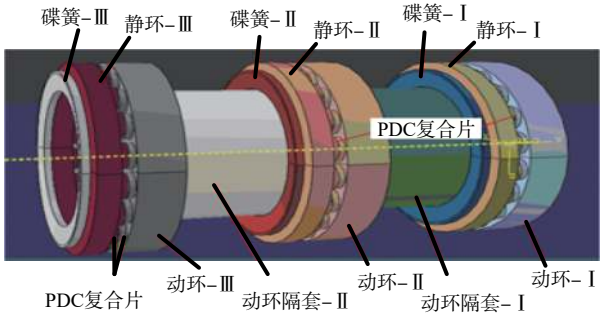


图 4 PDC 轴承的基本结构

Fig.4 Basic structure of the PDC bearing

2.4 冻土层井壁稳定性评价方法

在漠河、巴伦支堡地区进行了永久冻土采样, 并进行了全岩矿物分析与基础物性测试, 形成了人造冻土试样的制备方法, 建立了-25~25 ℃ 温度下的岩石力学试验系统(见 图 5)与试验方法, 开展了不同温度下的冻土强度试验、冻土声学响应试验、不同围压与温度条件下的冻土蠕变试验, 揭示了冻土特征参数随温度、埋深变化的规律(见 图 6); 建立了井筒-冻土层传热模型, 研究了钻井循环条件下钻井液温度对井周冻土层温度分布、应力分布的影响规律, 确定了冻土层井眼失稳的主要形式及原因, 揭示了井筒传热、井周冻土中冻结水融化、冻土强度降低、井壁应力大于冻土强度和井壁应变超过冻土可允许塑性变形极限导致井壁失稳的机理; 建立了冻土层衰减蠕变井眼收缩计算模型, 基于冻土层温度场和应力场的坍塌压力、破裂压力模型与冻土层压力剖面, 从而形成了冻土层井壁稳定预测与评价方法, 并提出了冻土层钻井安全钻井液密度和温度窗口的确定方法。

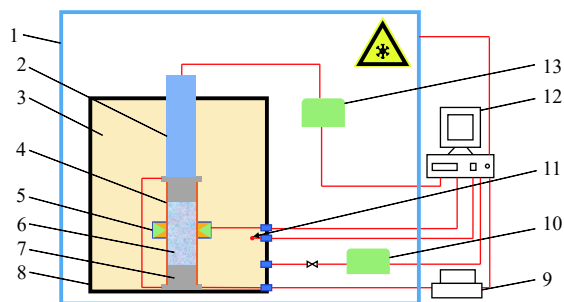


图5 低温岩石力学试验系统的基本组成

Fig.5 Basic composition of the rock mechanics test system at a low temperature

1. 冷库; 2. 轴压加载压头; 3. 低温液压油; 4. 橡胶套; 5. 变形传感器; 6. 冻土试样; 7. 声波压头; 8. 高压釜; 9. 声波仪; 10. 围压伺服系统; 11. 温度传感器; 12. 信息采集系统; 13. 轴压伺服系统

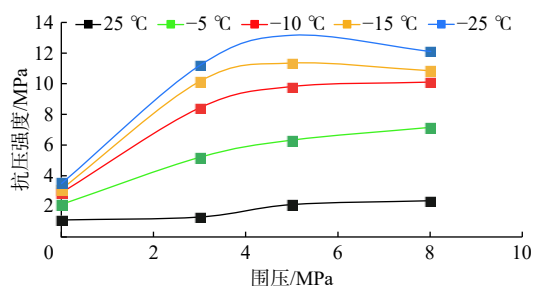


图6 埋深600 m冻土抗压强度随围压和温度的变化曲线

Fig.6 Curves representing the compressive strength of (600 m deep) permafrost with confining pressure and temperature

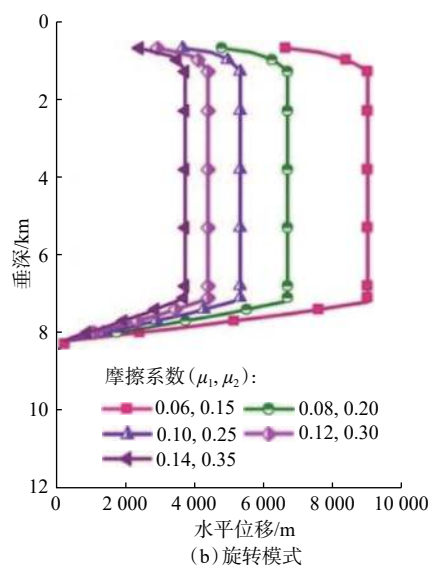
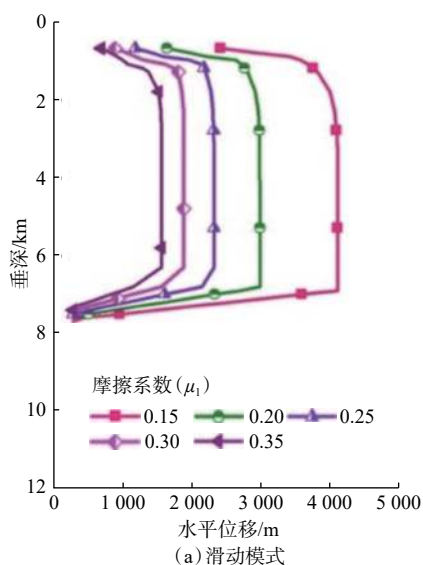


图7 不同条件下井眼延伸极限预测图版

Fig.7 Prediction chart for borehole extension limits under different conditions

2.6 低温防冻型钻井液体系

针对极地低温环境下常规钻井液流变性调控困

2.5 万米大位移井钻井优化设计技术

针对极地大位移井钻井面临的钻具易屈曲、岩屑床厚、摩阻高、扭矩大等技术难题,开展了以大位移井钻井管柱力学分析、水平段延伸极限计算方法、大位移井关键装备配套方案为重点的攻关研究,形成了分别基于机械延伸极限、水力和裸眼延伸极限的大位移井钻井优化设计技术。建立了长水平段钻进管柱力学模型、环空压耗和破裂压力计算模型,并以此为基础,建立了旋转钻井井眼延伸极限的定量预测模型,绘制了不同条件下井眼延伸极限的预测图版(见图7),并提出了以增大井眼延伸极限为核心的钻井优化设计原则和方法(主要包括井眼轨道、导向钻具组合及井下减阻工具的优化设计准则)^[31]。综合考虑实钻地层和环空多相流、环空岩屑浓度和环空波动压力等参数的影响,研究了连续油管钻井裸眼延伸极限,扩展和完善了破岩钻进、管柱上提和下放时的大位移井裸眼延伸极限预测模型^[32],并提出了一种将大位移井分成下部大斜度井段和上部常规井段的管柱优化设计方法、基于裸眼和水力延伸极限的钻井优化设计方法^[33]。万米大位移井钻井优化设计方法在萨哈林北维尼Z-42井进行了试验,该井完钻井深12 700 m,水平位移为11 739 m,垂深为2 338 m,位垂比高达5.02。

难、冻土层易井眼失稳、环境保护要求严苛等技术难题^[34-36],开展了钻井液低温流变性影响规律研究

及超低温钻井液基液的研发, 优选了多糖类聚合物低温流性调节剂、淀粉类低温降滤失剂、复合盐醇防冻剂及天然气水合物抑制剂等关键处理剂, 形成了 2 套低温钻井液体系: 0~4 ℃ 低温钻井液基础配方为 3.00% 膨润土浆+2.00% 泥页岩抑制剂 SDJA+0.15% 流性调节剂 XC+0.40% 聚合物降滤失剂 JLS-2+0.30% 淀粉类降滤失剂 CMS + 20.00% NaCl; -25~0 ℃ 低温钻井液基础配方为 20.00% 防冻剂 EG+25.00% NaCl+0.30% 流性调节剂 XC+0.30% 低温降滤失剂 RHPT-2+0.30% 淀粉类降滤失

剂 CMS+2.00% 封堵剂 CG+ 2.00% 低温润滑剂 TR, 主要性能见表 3。由表 3 可知, 上述 2 套低温钻井液体系的流变性受温度影响均较小, 0~4 ℃ 低温钻井液的 0 ℃ 与 30 ℃ 时的表观黏度比为 1.46; -25~0 ℃ 低温钻井液的-25 ℃ 与 30 ℃ 时的表观黏度比为 2.69, 0 ℃ 与 30 ℃ 时的表观黏度比为 1.60, 凝固点为-31 ℃。另外, 室内试验结果表明, 2 套低温钻井液体系的泥页岩回收率均大于 90%, 具有优良的润滑性能和天然气水合物抑制效果, 且环境友好, $LC_{50}>3\times10^4$ mg/L。

表 3 两种低温钻井液体系的常规性能
Table 3 Conventional performance of two low-temperature drilling fluid systems

钻井液	试验温度/℃	表观黏度/(mPa·s)	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa	φ6读数	API滤失量/mL	润滑系数	pH值
配方1	30	26.0	16.0	10.0	6	7.2	0.160	9
	10	31.5	21.0	10.5	6	6.4		
	0	41.5	24.0	17.5	7	5.6		
	-10	50.5	31.0	19.5	7	4.4		
	-25	70.0	44.0	26.0	9	3.0		
配方2	30	32.5	21.0	11.5	8	7.2	0.094	9
	4	44.5	28.5	16.0	9	4.4		
	0	47.5	31.0	16.5	10	3.0		

注: 配方1为-25~0 ℃低温钻井液体系; 配方2为0~4 ℃低温钻井液体系; 上述2种钻井液体系的密度均为1.15 kg/L。

2.7 低温早强固井水泥浆体系

针对极地低温固井面临的水泥浆稠化时间长、早期强度低等技术难题, 开展了水泥浆低温水化特征研究, 研发了新型负载型低温促凝剂, 优选了负温凝结硬化胶凝材料与关键外加剂, 形成了低温早强固井水泥浆体系。根据负温下水泥水化产物的分析结果(见图 8), 分析了该水泥浆体系的低温强度

发展机理: 负载型低温促凝剂具有多活性基团, 能够缩短水泥在低温下的水化诱导期, 形成较强的水化结合力, 同时分子流体力学体积小, 在水化加速期能快速进入到水化层内, 缩短凝结期。室内试验结果表明, 该水泥浆体系具有较高的早期强度, 0 ℃×8 h 抗压强度为 3.61 MPa, 12 h 抗压强度为 8.5 MPa, 水化放热速率缓慢。

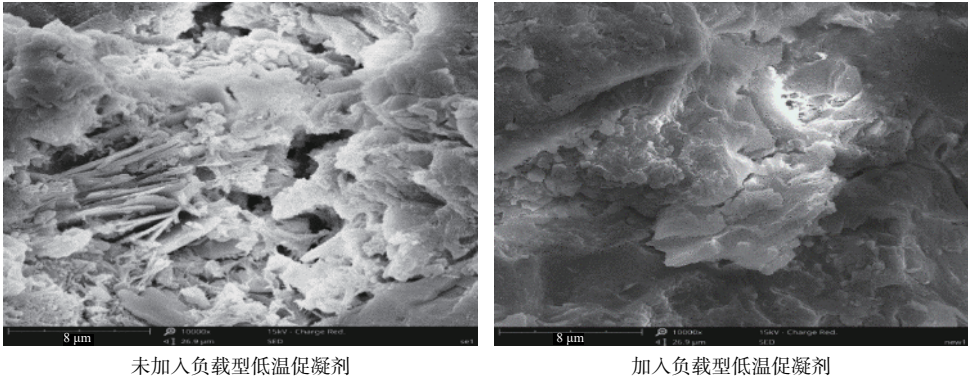


图 8 低温早强固井水泥浆水化产物分析结果
Fig.8 Hydration products analysis of low-temperature early-strength cement slurry

3 发展建议

“十三五”期间,我国在极地冷海钻井装备与技术方面取得了较大的进展,但整体技术水平不够高,还不具备在北极圈内独立钻井作业的能力^[37]。随着我国与俄罗斯等国家油气勘探开发合作的进一步加强,北极油气开发在陆地上将进入更高纬度、更厚永冻层区域,海洋上将向更深水域、常年冰或更厚浮冰海域进军^[38],这对我国极地冷海钻井技术提出了更高的要求。因此,需进一步完善极地冷海钻井完井技术理论与方法,研制新型钻井完井关键装备与工具,形成较为完善的极地冷海钻井完井技术体系,具备-50℃温度下陆地、-20℃温度下海域(水深1 000 m)、12 000 m大位移井钻井完井作业能力,显著提升我国石油公司在极地油气合作项目中的经济效益和核心竞争力。

3.1 形成钻井灾害风险评价与控制技术体系

在“十三五”极地水文气象灾害和浅层地质灾害风险评价与控制技术研究的基础上,进行一系列技术攻关,建立较为完整的钻井灾害风险评价与控制技术体系,为准确识别灾害风险、科学制定防控措施提供支撑。

1)研发适应于北极冰区海域的浮冰灾害预警与平台安全控制技术,通过开展浮冰周期性分布规律统计分析、浮冰运动状态模拟、浮冰运动动态监测技术优选和浮冰灾害防治方案优化设计,形成极地浮冰漂移轨迹模拟预测软件,形成满足50年一遇条件下的极地冷海钻井平台海冰灾害监测、分析、预警与安全控制的最优方案,实现对危险工况的有效识别^[39-41]。

2)建立针对冻土层、冻土天然气水合物层地球物理响应特征与识别方法,进一步明确冻土层与冻土天然气水合物层温压变化条件下物性与力学特征的演化规律,完善井口稳定性分析方法与钻井液温度、安全密度窗口确定方法。

3.2 加大钻井完井关键装备与工具的研制

1)针对北极恶劣的作业环境,开展低温钻机自动化技术研究^[42-44],通过研制自动排管机械手及控制系统,对钻机作业空间区域内的自动化工具及游动系统间运动轨迹和控制逻辑进行研究,研制出具有自动化排管系统、能满足-50℃温度要求、钻井能力达到12 000 m的低温钻机。

2)开展低温固井装备及配套技术研究,通过研

究固井装备保温技术、基于密闭环境的固井装备I区防爆技术和低温混浆系统,形成适应-50℃温度、功率达到2 600 kW(3 500 hp)的低温固井装备。

3.3 开展钻井安全控制关键技术研究

1)开展厚冻土层安全钻井技术研究,通过研究冻土层井段井筒瞬态温度场分布规律、研制地面降温系统、研发低温泡沫钻井液体系和低水化热水泥浆体系^[45],形成井筒温度分布预测软件和钻井液降温系统,确保钻井液入口温度在-4~4℃间可调,控制精度达1℃;低温泡沫钻井液-5℃温度下的半衰期>300 s;低水化热水泥浆体系与常规水泥浆体系相比水化放热量降低30%,从而满足巨厚层冻土层安全钻井、固井要求^[26]。

2)针对北极地区的复杂地层压力体系,开展智能压井方法与节流控制装备研发^[46],通过研究极地复杂压力体系地层信息智能识别方法和基于多相流动模拟与实时数据耦合驱动的智能压井调控方法,研制智能压井节流控制系统和智能压井控制系统,以提高地层溢流风险识别准确度,提高井控参数的准确率和控制精度,提高井控效率,保障北极地区钻井井控安全,有效避免井控事故的发生。

3.4 发展钻井环保关键装备与技术

1)研发无隔水管钻井液回收钻井系统^[47]。通过研究海底圆盘泵、控制系统与配套技术,研制形成功率超过1 000 kW的海底泵系统,开展钻柱和回流管线流动保障技术与无隔水管钻井液回收钻井系统安全作业优化设计,形成能够适应水深1 000 m以深,温度-20℃海上作业环境,满足零排放环保要求的无隔水管钻井液回收钻井系统。

2)开展冰区海域溢油扩散规律与防治方法研究。通过研究北极冰区海域溢油形态表征方法,深入分析不同类型冰区溢油扩散和漂移规律,研究溢油扩散范围监测和冰区溢油阻隔、清除收集方法,建立冰区海域溢油漂移扩散模型,形成溢油污染范围的科学预测方法和及时高效的冰区海域溢油应急处理方案。

3.5 启动北极油气开发及集输重大装备的研制

虽然我国(以中集来福士海洋工程有限公司为代表)已经形成了较为成熟的适应于北极冰区海域作业的半潜式钻井平台(作业水深可达1 500 m)的设计与制造技术,但在勘探和滩浅海钻井完井、生产和集输等重大装备领域目前还处于空白。因此,需要研制北极油气开发及集输重大装备:1)开展具有抗1.0 m厚浮冰能力的自航式极地勘探船的设计

与制造技术研究;2)开展适应于滩浅海重力式平台的设计与制造技术研究,以满足水深20 m、温度 -50°C 、 $30\times 10^3\text{ t}$ 浮冰或厚度1.5 m常年冰的作业环境要求;3)开展冰区海域LNG船的设计与制造技术研究,使抗冰能力达到1.0 m厚浮冰,以满足北极冰区海域油气集输需求。

3.6 加强国际合作与成果转化,积极参与标准建设

开展中俄极地油气技术与装备联合实验室建设,积极推进中俄两国高等院校、石油企业的联合与协作,为两国极地油气开发领域高新技术研究提供科技合作与人员交流平台;搭建中俄联合极地油气技术与装备创新成果转化平台,建议我国相关部门以中俄亚马尔油气田开发、帕亚哈油气田开发等重大合作项目为契机,加强与俄政府、俄气、俄油、诺瓦泰克等油气公司的交流与沟通,联合建立北极油气开发高新技术试验区,加快相关新技术、新装备在北极油气田的现场试验和商业化应用进程,推动科技成果转化;积极参与北极地区钻完井工程技术标准和操作规范的制定,奉献中国智慧,树立中国标准,在北极油气领域标准建设中抢占先机。

4 结论

1)极地冷海地区油气资源丰富,形成以钻井完井技术为核心的工程技术体系是提升我国在北极能源合作开发方面话语权和竞争力的关键。

2)通过技术攻关,中国石化在极地浅层地质灾害定量风险评价技术、 -50°C 低温轨道钻机及钻井工具、冻土层井壁稳定性评价与控制技术、低温管柱强度校核与设计技术、低温钻井液与固井水泥浆等关键工作液体系等方面取得重大进展,初步形成了极地冷海钻井关键技术体系,为解决北极冰区的钻井生产问题奠定了坚实的基础。

3)随着勘探开发的不断深入,极地冷海油气藏安全高效开发还将面临一系列新难题和新挑战,除进一步完善与扩大应用已形成的钻井关键技术外,建议开展极地冷海钻井关键装备的设计制造与关键技术研究,形成极地冷海油气藏安全高效开发钻井完井配套装备及工程技术体系,为实现我国极地油气资源开采技术的跨越式发展提供理论与技术支撑。

致谢:在撰写本文过程中得到了中国石化石油机械股份有限公司池胜高和吴刚、中国石油大学(北京)李莅临和王宴滨、中国石化石油工程技术研究院何青水和牛成成等同志的大力帮助,在此表示感谢。

参考文献

References

- [1] 中华人民共和国国务院办公厅. 中国的北极政策 [EB/OL]. (2018-01-26) [2020-02-06]. <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1618203/1618203.htm>.
The state council information office of the People's Republic of China. China's Arctic policy [EB/OL]. (2018-01-26) [2020-02-06]. <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1618203/1618203.htm>.
- [2] HAMILTON J M. The challenges of deep-water Arctic development[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2011, 21(4): 241-247.
- [3] 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.
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.
LI Hao Wu, TONG Xiaoguang. Exploration potential analysis of oil and gas resources in Arctic regions[J]. China Petroleum Exploration, 2010, 15(3): 73-82.
- [5] 崔白露, 王义桅. “一带一路”框架下的北极国际合作: 逻辑与模式 [J]. 同济大学学报(社会科学版), 2018, 29(2): 48-58.
CUI Bailu, WANG Yiwei. International cooperation on the Arctic under the Belt and Road Initiative: logics and models[J]. Journal of Tongji University (Social Science Section), 2018, 29(2): 48-58.
- [6] WHITEMAN G, HOPE C, WADHAMS P. Climate science: vast costs of Arctic change[J]. Nature, 2013, 499(7459): 401-403.
- [7] 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.
LU Baoping, LI Guohua. Russia Sakhalin offshore drilling EPC project[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2009.
- [8] 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.
- [9] 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(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(3): 10-18.
- [10] WINKLER M M. Frontier Arctic offshore exploration drilling business challenge[R]. OTC 29144, 2018.
- [11] Eurasia Group. Opportunities and challenges for Arctic oil and gas development[R]. OTC 24586, 2014.
- [12] SOUTHAM A L. the impact of non-technical risks on oil and gas activities in Alaska's Arctic[R]. SPE 166811, 2013.
- [13] FEBBO E, PAYNE K, REEP B. Technology and innovation for environmental monitoring on Alaska's North Slope[R]. SPE 184471, 2017.
- [14] SMITS C C, HUBER E. A social license to operate in the Arctic: exploring the challenges and opportunities for offshore oil and gas activities in Greenland[R]. SPE 179343, 2016.
- [15] CHOU Q, MURTAZA M, MAMMADOV E, et al. Arctic drilling hazard identification relating to salt tectonics[R]. OTC 27396,

- 2016.
- [16] 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.
- DANG Xuebo, LI Huaiyin. Offshore engineering modes and key technologies in Arctic[J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2016, 42(4): 1-6.
- [17] 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 equipment for Arctic deepwater drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2013, 41(3): 7-12.
- [18] LI Huaiyin, DANG Xuebo, ZHU Kai. Review and outlook on Arctic offshore facilities & technologies[R]. OTC 25541, 2015.
- [19] 杨进, 路保平. 极地冷海钻井技术挑战及关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2017, 45(5): 1-7.
- YANG Jin, LU Baoping. The challenges and key technologies of drilling in the cold water area of the Arctic[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(5): 1-7.
- [20] FENG Wen, JAMES B, CHEUNG T O, et al. Study on the material properties of aged steel exposed to the Arctic environment[R]. OTC 29161, 2018.
- [21] NEAL P, FELIPE M, JOHN E, et al. Shallow water subsea drilling and production structure to resist sand and ice keel intrusion in Arctic environments[R]. OTC 27440, 2016.
- [22] JI Guodong, WANG Haige, WANG Lingbi, et al. Current situation and development trend of Arctic drilling equipment[R]. ISOPE-I-13-184, 2013.
- [23] UTVIK T I, JAHRE-NILSEN C. The importance of early identification of safety and sustainability related risks in Arctic oil and gas operations[R]. SPE 179325, 2016.
- [24] TORSÆTER M, CERASI P. Mud-weight control during Arctic drilling operations[R]. OTC 25481, 2015.
- [25] XIE Jueren, MATTHEWS C M. Methodology to assess thaw subsidence impacts on the design and integrity of oil and gas wells in Arctic regions[R]. SPE 149740, 2011.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 李莅临, 杨进, 路保平, 等. 深水水合物试采过程中地层沉降及井口稳定性研究 [J]. 石油钻探技术, 2020, 48(5): 61-68.
- LI Lilin, YANG Jin, LU Baoping, et al. Research on stratum settlement and wellhead stability in deep water during hydrate production testing[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(5): 61-68.
- [29] 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 Pingan, WANG Zhizhong, et al. Development of ZJ40 /2250DBG low-temperature track drilling rig[J]. *China Petroleum Machinery*, 2014, 42(11): 64-68.
- [30] KAMATOV K. Hybrid drill bit for horizontal drilling in highly interbedded formations of timano-pechora Arctic fields[R]. SPE 166841, 2013.
- [31] 高德利, 黄文君, 李鑫. 大位移钻井并延伸极限研究与工程设计方法 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 1-8.
- GAO Deli, HUANG Wenjun, LI Xin. Research on extension limits and engineering design methods for extended reach drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 1-8.
- [32] 黄文君, 石小磊, 高德利. 基于钻井延伸极限的管柱分段优化设计方法 [J]. 石油机械, 2020, 48(4): 1-8.
- HUANG Wenjun, SHI Xiaolei, GAO Deli. Piecewise optimal design method of tubular strings based on extended-reach drilling limits[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(4): 1-8.
- [33] CHEN Wei, SHEN Yuelin, CHEN Rongbing, et al. Simulating drill-string dynamics motion and post-buckling state with advanced transient dynamics model[J]. *SPE Drilling & Completion*, 2021: 1-15.
- [34] BUI B T, TUTUNCU A N. A generalized rheological model for drilling fluids with cubic splines[J]. *SPE Drilling & Completion*, 2015, 31(1): 26-39.
- [35] MAHMOUD O, NASR-EL-DIN H A, VRYZAS Z, et al. Effect of ferric oxide nanoparticles on the properties of filter cake formed by calcium bentonite-based drilling muds[J]. *SPE Drilling & Completion*, 2018, 33(4): 363-376.
- [36] 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.
- [37] WINKLER M M, JAHRE-NILSEN C. Arctic response technology JIP key achievements and final deliverables[R]. OTC 29120, 2018.
- [38] RAKHMANGULOV R, EVDOKIMOVA I, DOBROKHLEB P, et al. Entering the Arctic gate: high end drilling at the high latitude[R]. SPE 181922, 2016.
- [39] HASLING J F. Predicting the timing and duration of Arctic sea ice and its implications on future drilling seasons in the Chukchi Sea and Beaufort Sea[R]. OTC 27443, 2016.
- [40] EFIMOV Y O, KORNISHIN K A, SOCHNEV O Y, et al. Evaluation of exploration drilling scenarios in the southwestern part of the Kara Sea[R]. ISOPE-I-20-1272, 2020.
- [41] GUZENKO R B, MIRONOV Y U, KHARITONOV V V, et al. Complex study of large ice features and assessment of morphometric, physical-strength and age characteristics of a composite ice ridge[R]. ISOPE-I-20-1260, 2020.
- [42] ISRAEL R, McCRAE D, SPERRY N, et al. Delivering drilling automation II: novel automation platform and wired drill pipe deployed on Arctic drilling operations[R]. SPE 191574, 2018.
- [43] LAI S W, NG J, EDDY A, et al. Large-scale deployment of a closed-loop drilling optimization system: implementation and field results[J]. *SPE Drilling and Completion*, 2021, 36(1): 47-62.
- [44] WILSON A. Automated operations and wired drillpipe benefit Arctic drilling[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2019, 71(2): 62-64.
- [45] GOVINDU A, AHMED R, SHAH S, et al. The effect of inclination on the stability of foam systems in drilling and well operations[J]. *SPE Drilling & Completion*, 2020: 1-18.
- [46] KINIK K, GUMUS F, OSAYANDE N. Automated dynamic well control with managed-pressure drilling: a case study and simulation analysis[J]. *SPE Drilling & Completion*, 2015, 30(2): 110-118.
- [47] STAVE R, FOSSLI B, ENDRESEN C, et al. Exploration drilling with riserless dual gradient technology in Arctic waters[R]. OTC 24588, 2014.