

引用格式: 杨进, 傅超, 刘书杰, 等. 中国深水钻井关键技术与装备现状及展望[J]. 世界石油工业, 2024, 31(4): 69-80.

YANG J, FU C, LIU S J, et al. Current status and prospects of key technologies and equipment for deepwater drilling in China[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(4): 69-80.

中国深水钻井关键技术与装备现状及展望

杨进¹, 傅超¹, 刘书杰², 李中³, 张伟国⁴, 刘正礼⁴

(1. 中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院, 北京 102249; 2. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海南 海口 570100; 3. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 4. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 随着陆上和浅水区域钻井技术日渐成熟, 石油行业将研究重心转向深水区域, 近10年全球重大油气发现70%来自海洋深水区域。深水钻井具有高风险、高技术、高投入的特点, 其关键技术和装备是世界油气强国竞相角逐的技术制高点。随着在超深水、深层、远海“两深一远”区域勘探开发的持续推进, 深水钻井需要面对深水、海况恶劣、浅层土质不稳定以及深层地质条件复杂等挑战。通过多方联合技术攻关和工程实践, 中国已成功构建了具有国际竞争力的深水钻井技术与装备体系, 包括深水钻井工程设计关键技术、深水钻井安全控制及高效作业技术、深水钻井关键装备。对相关成果进行了系统介绍, 提出了融合人工智能和大数据技术创新钻井技术、加快工程地质一体融合、促进工程装备和软件研发、加强深远海钻井作业应急能力等建议, 进一步推动深水油气勘探向深远海发展, 实现深水钻井作业的安全高效和自主可控。

关键词: 深水钻井; 钻井设计; 安全控制; 作业技术; 深水钻井装备

中图分类号: TE52

文献标识码: A

文章编号: 1006-0030(2024)04-0069-012 **DOI:** 10.20114/j.issn.1006-0030.20240624001

Current status and prospects of key technologies and equipment for deepwater drilling in China

YANG Jin¹, FU Chao¹, LIU Shujie², LI Zhong³, ZHANG Weiguo⁴, LIU Zhengli⁴

(1. School of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Hainan Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Haikou, Hainan 570100, China; 3. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China; 4. Shenzhen Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: With the increasing maturity of onshore and shallow water drilling technology, the petroleum industry is shifting its focus to deepwater areas. In the past decade, 70% of major global oil and gas discoveries have come from deep-water marine areas. Deepwater drilling has the characteristics of high risk, high technology and high investment, its key technology and equipment are the technological high ground that world oil and gas powers compete for. With the continuous exploration and development in the "two deep and one far" areas of ultra-deepwater, deep layers, and far seas, deepwater drilling must confront challenges such as deep waters, severe sea conditions, unstable shallow soil, and complex deep geological conditions. Through collaborative technical breakthroughs and engineering practices, China has successfully developed an internationally competitive deepwater drilling technology and equipment system. This includes key technologies for deepwater drilling engineering design, safety control and efficient operation techniques, as well as essential deepwater drilling equipment. This paper provides a systematic introduction to relevant achievements, proposing innovative drilling technologies that integrate artificial intelligence and big data technology, accelerate the integration of engineering geology, promote the research and development of engineering equipment and software and strengthen emergency response capabilities for deep and pelagic drilling operations. It further promotes the development of deepwater oil and gas exploration towards deep and pelagic areas, achieving safe, efficient and self-controlled deepwater drilling operations.

Keywords: deepwater drilling; drilling design; security control; operation technique; deepwater equipment

收稿日期: 2024-06-24

修回日期: 2024-07-09

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金重点支持项目“深水含水合物海洋土与水下桩基耦合作用及失稳机理研究”(U22B20126); 国家重点研发计划项目“深水生产系统泄漏检测及应急处置技术与装备”(2022YFC2806110); 山东省重点研发计划“高效环保延时膨胀表层导管研发及产业化”(2022CXGC020406); 中国石油科技基金项目“原油提高采收率重大开发试验”(2023YQX10407ZK)

第一作者: 杨进(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 从事钻完井技术、海洋工程教学和研究工作。

E-mail: cyjin1018@vip.sina.com

0 引言

随着能源需求的增长以及陆上和浅水油气田钻井技术的日渐成熟,研究重心已逐步转向更复杂且挑战更大的深水区域。国际上通常将水深超过500 m的区域定义为深水区域^[1]。中国南海作为全球四大油气聚集地之一,拥有约 700×10^8 t的地质储量,约占中国总油气资源的三分之一,已经成为中国能源战略的重要支点和增长领域^[2]。因此,开发南海深水油气资源对于确保国家能源安全及维护海洋权益具有至关重要的意义。

深水钻井因其技术复杂、操作风险高和资金投入大的特点而被视为高端技术领域。作为全球最大的油气资源消费国之一,中国在过去30年里大力发展海洋深水钻井技术和装备,以确保能源的自主供应和持续性。中国深水钻井技术经历了跟踪学习、合作引进和自主创新3个阶段,现已形成一套相对完善的深水钻井技术体系,实现了从浅水钻井到深水钻井的技术跨越^[3-4]。在深水钻井装备领域,得益于国家重点研发计划和中国海洋石油集团有限公司(以下简称中国海油)的战略投入,中国成功研制出了包括深水半潜式钻井平台、水下采油树、水下应急封井装置、水下井口等一系列具有自主知识产权的关键设备^[5-6]。这些成果显著提升了中国在深水钻井领域的技术水平和安全保障能力。然而,面对超深水(水深 $\geq 1\,500$ m)、深层(埋深 $\geq 3\,500$ m)、

远海(离岸 ≥ 500 km)等更加极端复杂的环境条件,中国在深水勘探钻井技术、安全应急保障能力和关键技术装备方面仍面临一定的挑战^[7-8]。

本文系统总结了深水钻井关键技术与装备体系的成果。随着钻井技术向数字化和智能化方向发展,结合工程地质一体化技术融合、关键装备的国产化进程,以及远洋风险控制和应急能力的增强,中国深水钻井技术和装备的创新能力将进一步增强。这不仅能够支持国家的深远海战略,也将满足日益增长的能源勘探开发需求,助力中国在全球能源安全格局中占据更为重要的地位。

1 深水钻井工程发展进程及挑战

国外在20世纪80年代开始深水钻井作业,目前深水钻井技术和装备已相当成熟。道达尔公司在2016年作业的Raya-1探井,作业水深达3 400 m,创全球海上油气勘探最大水深记录^[9-10]。图1展示了全球深水钻井作业水深的发展历程。

中国深水钻井技术起步较晚,基础薄弱^[11-12]。1990年之前,中国的深水钻井几乎完全依赖国外的技术装备和作业队伍;1990—2000年期间,中国开始派遣技术人员到海外学习,引进吸收部分技术;2000—2010年期间,通过国际合作和自主研发,中国海油联合国内石油院校和科研机构,在国家重大项目支持下,突破了深水钻井关键技术,合作开发了

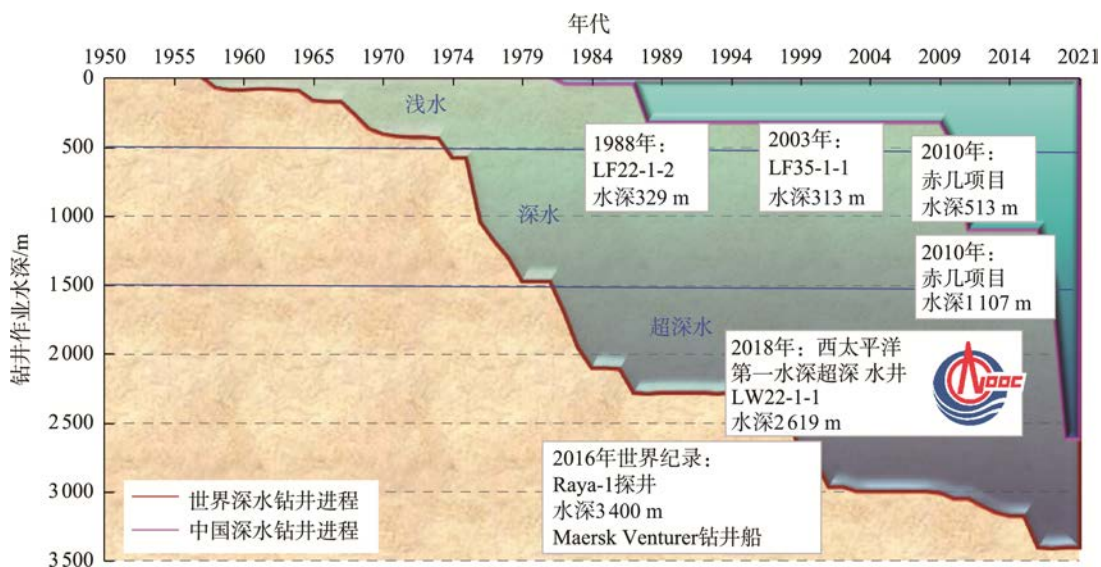


图1 全球深水钻井作业水深发展进程

Fig.1 Development process of operating depth in global deepwater drilling

中国第一个深水气田—荔湾3-1；2010年后，随着应用实践和技术完善，中国的深水钻井技术不断成熟，作业水深逐步增加^[13-16]；2014年，中国海油在陵水17-2区域完成了超深水（ $\geq 1\,500\text{ m}$ ）钻探作业^[17]；2018年，中国海油成功完成了水深2 619 m的LW22-1-1井钻探作业，成为西太平洋海域深水钻井作业水深最大的井^[10, 18]；2021年，中国首个自主勘探开发的1 500 m深水大气田“深海一号”正式投产，标志着中国海洋油气经济开发迈向深水领域。中国通过跟踪学习、合作引进和自主创新，用30年时间实现了从浅水到深水、从深水自主勘探到深水自主开发的重大跨越。

深水区域的恶劣海洋环境和复杂地质条件给钻井技术和装备带来诸多挑战：①在超过500 m水深的深度下，高压条件对钻井装备和材料的耐压性能和结构完整性提出了更高的要求；②深水区域台风季节长、频次高、强度大、危险性高，钻井工况恶劣，避台周期长达10~15 d；③深水区域的地质结构通常较为复杂，钻井作业面临高温高压、深层花岗岩等环境，断层、盐穹隆、高渗透率砂层等区域的地层压力难以预测；④强烈的海流及内波流也会影响钻井作业的稳定性和安全性，比如南海海域内波发育，难以预测；⑤深水海域远离陆地，一旦发生事故，如油气井失控或设备故障，应急响应的难度和成本极高。针对这些挑战，经过多年持续攻关，中国在深水钻井工程设计技术、安全控制及高效作业技术和钻井装备等方面取得了一系列关键成果。

2 深水钻井工程设计关键技术

2.1 深水地层压力预测及井壁稳定分析技术

深水地层压力预测和井壁稳定分析是深水钻井设计中至关重要的环节，其准确性直接关系到钻井作业的安全性和经济性。近年来，中国石油大学（北京）金衍教授团队利用随钻测井数据，成功构建了深水井异常高压泥页岩层段的声波波速与密度交会图，合理揭示了深水井异常高压的成因机制。此外，结合室内声波测试实验，该团队发展了一个基于加卸载过程的多参数地层压力预测模型^[19-21]，对油田大量井漏数据进行了数学处理和分析，运用模糊识别理论，建立了基于各参数间模糊关系的欧

氏贴近度与井漏程度关系模型，进而开发了一种漏失层位的模糊识别钻前风险预测模型^[22]。通过钻前预测与钻后总结的分析模式，该技术在南海东部深水探井作业中得到了良好的应用。图2为深水地层压力示意图。

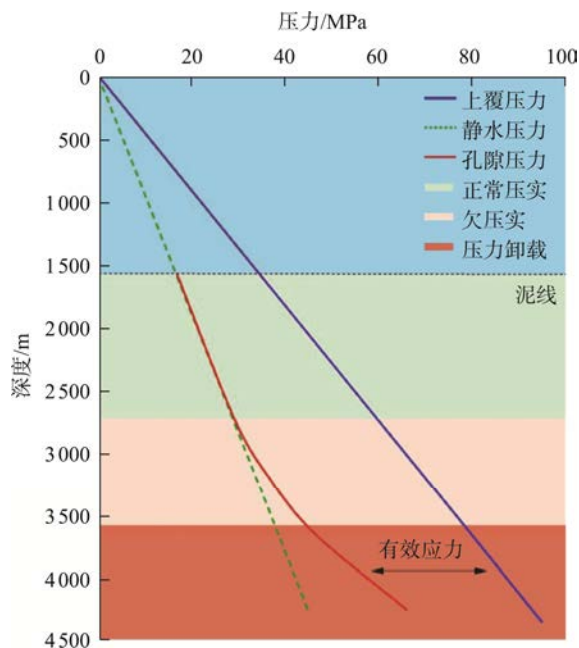


图2 深水地层压力示意图^[23]

Fig.2 Schematic diagram of deepwater formation pressure^[23]

2.2 深水井身结构优化设计技术

2.2.1 动态井身结构设计技术

深水钻井中，由于海底地质高度不确定性和作业压力窗口窄，中国海油借助多年的深海钻探经验，开发出了“井身结构实时决策树”^[5]。该决策树在实际钻探过程中发挥着至关重要的作用，可提前预留出套管层次余量，根据钻井的关键阶段实时监控作业窗口，及时作出井身结构调整决策。这种动态决策工具通过实时数据分析，确保在遇到地质异常或技术挑战时，能迅速作出合理的调整，优化钻井策略，降低潜在的风险，保证钻井作业的顺利进行，目前已应用于南海所有深水井的设计，提高了深水钻井作业效率。

2.2.2 浅层井身结构设计方法

浅层井身结构的设计需要考虑井控安全、浅层地质灾害、作业参数、井口承载力，是井身结构设计重点。基于土体圆孔扩张理论，中国石油大学（北京）团队通过室内和现场大型模拟实验，构建

了导管周围土体位移、应力理论模型,创新提出了综合考虑导管下入作业时间、排量和钻头伸出量多因素深水表层导管实时承载力计算模型^[24-25],发明了基于作业参数控制的表层导管下入深度多因素设计方法^[26-27],已形成国际标准(ISO3421)。发明了考虑井控安全、浅层地质灾害和井口承载力多因素表层套管下入深度设计方法,2019年成功应用于南海深水井,创20 min表层套管下深1 392 m的纪录。

2.3 深水隔水管设计技术

隔水管是特定用于海洋钻井的组件,用于连接海底井口和水面钻井平台,为钻井提供通道(见图3)。通过隔水管内、外压力的受力分析,结合深水特殊工况,建立了基于窗口最大化隔水管顶张力优化方法^[28]。基于深水隔水管作业工况和耦合受力模型,分析了隔水管系统失效模式,建立了隔水管失效风险定量评估模型。通过可控作业因素(顶张力、平台偏移)对隔水管力学稳定性的影响分析,建立了考虑钻柱随机碰撞和平台运动的隔水管力

学分析模型,形成了隔水管-井口系统一体化设计技术^[29-31]。当前,中国隔水管设计考虑了涡激振动和作业载荷对隔水管的动态响应,能完全满足深水作业设计要求,并且达到国际同等水平。隔水管系统通常包括单根隔水管、伸缩节、挠性接头和底部总成等部件。豪迈集团股份有限公司已成功制造单根隔水管产品,然而伸缩节和底部总成等重要部件仍需依赖国外技术和产品。

2.4 深水水下井口稳定性分析技术

深水水下井口是海洋钻井中的关键结构,用于确保井控安全、连接海底油气藏与海面设施,并适应复杂的深海环境^[32]。深水水下井口系统受钻井平台、管柱等耦合作用,受力复杂、全寿命周期疲劳分析难度大^[33-34]。基于多体动力学和几何精确梁理论,建立了刚体、梁、约束副等组成的“水下井口-隔水管-浮式平台”系统耦合力学模型(见图4),可求解在无隔水管钻进、防喷器安装、测试作业等不同工况水下井口的位移、应力和弯矩等力学参数,进而全面分析水下井口在整个作业周期的稳定性^[35]。

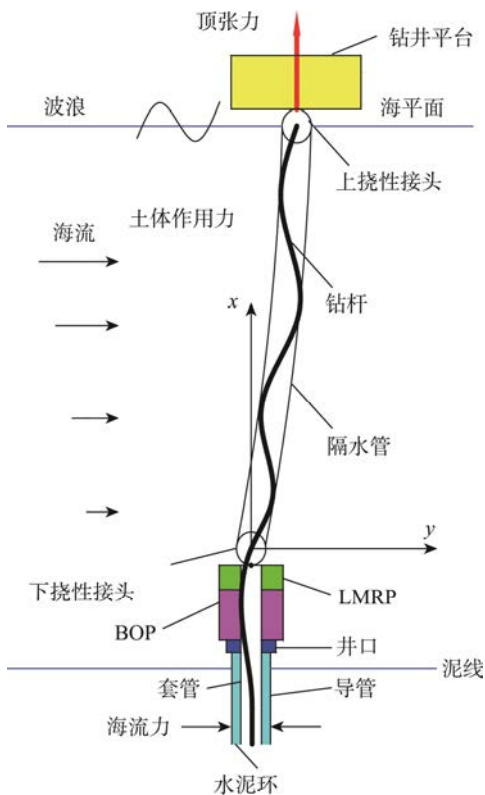


图3 “水下井口-隔水管-钻杆-浮式平台”耦合系统
Fig.3 Coupling system of "underwater wellhead-riser-drill pipe-floating platform"

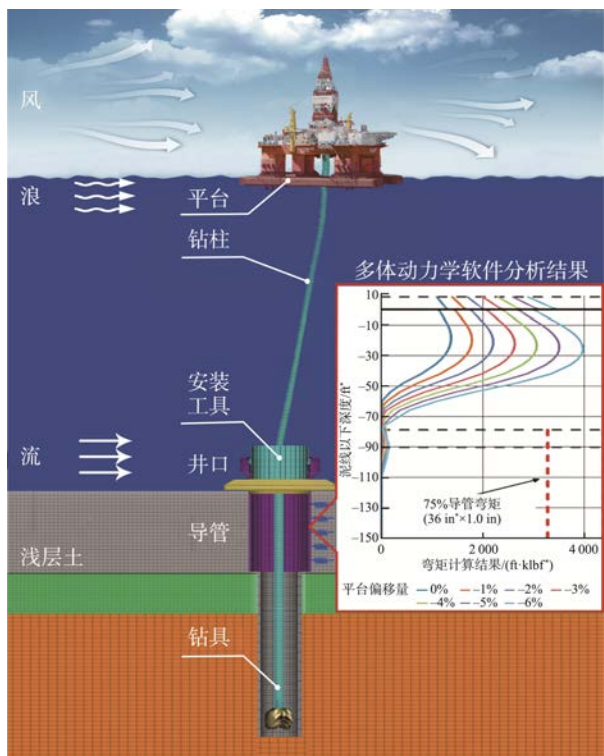


图4 水下井口稳定性分析原理
Fig.4 Principle of underwater wellhead stability analysis

* 非法定计量单位, 1 in=25.4 mm, 1 ft=0.304 8 m, 1 ft·lbf=1.355 818 N·m, 下同

3 深水钻井高效作业及安全控制技术

3.1 深水浅层地质灾害预测及控制技术

深水油气区地质环境极端复杂,浅层欠压实程度高,地层广泛存在浅水流、浅层气和浅层水合物(以下简称“三浅”),易引发地质灾害,对钻井安全构成重大威胁。浅层地质灾害的预测主要通过地震数据、浅部地层剖面探测数据进行识别分析^[36]。基于“压力圈闭”假设和下水多相瞬态流动模型,通过现场作业实践与数值模拟发现了不同压力、气量在不同水深条件下的放喷规律,建立了浅层地质灾害风险分级评估技术^[37]。结合深水浅层钻井作业应急能力,创建了浅层气、浅水流等地质灾害风险分级控制作业技术,形成了“低风险钻小尺寸导眼再随钻扩眼、中风险钻孔主动放喷后再作业、高风险直接移井位钻定向井”的分级控制方法(见图5)^[1]。

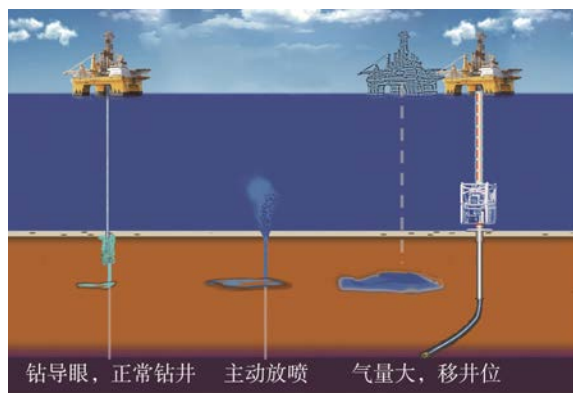


图5 浅层气风险分级控制方法

Fig.5 Risk classification control method for shallow gas

3.2 深水浅层高效钻井技术

针对深水浅层“钻一开下导管+钻二开下表层套管+钻三开下技术套管”传统“三趟钻”模式带来的工序多、时间长的难题,发明了“导管送入+连续钻进”安装工具,实现了“一开喷射随钻下导管,导管到位后安装工具解脱,继续钻二开”的“二合一”功能。基于对浅部地层压力精确预测和全寿命水下井口稳定性分析,发明了能够实现表层套管与技术套管功能组合的一体化接头,在“二合一”的基础上开创了深水浅层“三合一”连续钻进高效钻井模式(见图6),实现了导管、表层套管和技术套管3个井段一趟钻完成,浅层建井平均作业时间从10 d降至4.5 d^[1]。

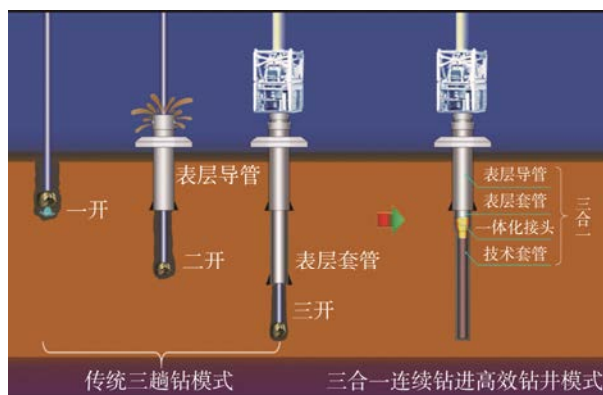


图6 深水表层建井技术模式对比

Fig.6 Comparison of deepwater surface well construction technology models

3.3 深水钻井井控关键技术

3.3.1 深水溢流监测技术

基于对深水水下溢流的数据采集与信息挖掘工作,创立了一种新的水下早期溢流识别技术^[38]。中海油研究总院有限责任公司开发了一种水下溢流早期监测装置,通过对原理样机和工程样机的广泛测试,验证了监测装置的效能。采用分析融合算法,集成了“水上、水下、井下”多源数据的深水钻井井口安全监控与井喷智能预警系统,能够有效地分析和预警潜在的井控风险^[39-42]。

3.3.2 深水动态压井技术

动态压井技术(Dynamic Kill Drilling, DKD)主要用于处理浅层气和浅水流等深水钻井问题,最初在墨西哥湾地区得到应用^[43-44]。中国后来引进了这项技术,用于深水表层钻井。该技术的核心原理是利用随钻压力温度测量仪和水下机器人等设备实时监测井下状况,一旦监测到异常,即自动或手动控制多相流混合装置,迅速将重钻井液与海水混合后泵入井中,以控制浅层溢流等风险。借助国家重大项目支持,中国海油近年来已研发并部署了动态压井技术及相关装备,在主要深水钻井平台上得到应用^[45-46],提高了浅层井身质量,减少了作业过程中的井漏问题。

3.3.3 防喷器控制技术

防喷器系统是深水钻井作业中的核心安全系统,对于管理复杂和极端的深水钻井环境至关重要。防喷器系统通过增强的冗余设计、远程控制功能和自动化安全特性,确保在压力异常时能够迅速有效地控制井口压力和防止井喷。深水防喷

器系统包括多套阀门和闭合装置, 以提供额外的安全保障^[47-48]。防喷器系统与动态压力管理技术整合, 实现精细控制井下压力, 极大降低井控事件的风险, 提升深水作业的安全性和效率。

3.4 深水钻井应急安全技术

深水钻井应急安全技术主要包括深水钻井避台策略、隔水管应急解脱技术和应急救援井技术等。基于对南海台风模式的研究, 并结合早期预报模型, 采用了结合警戒区划分和台风准备时间(T-time)的方法。警戒区划分为蓝色、黄色和红色三级, 每个级别都制定了相应的避台响应方案。隔水管应急解脱是深水钻井中的关键安全操作, 用于在遇到极端天气、平台失稳、火灾等紧急情况时, 迅速断开隔水管与平台的连接, 保护设备和人员安全。以平台航速作为隔水管顶部钻井船的运动边界条件, 同时考虑不同流向的波流载荷作用, 建立了台风条件下悬挂隔水管撤离作业技术^[49-51]。图7为隔水管系统解脱后悬挂航行。针对南海的特定自然条件和深水救援井的需求, 开展了救援井的井位选择优化、井眼轨迹设计、管柱配置及对接技术研究^[52], 从而形成了适合中国深水环境的救援井技术体系。

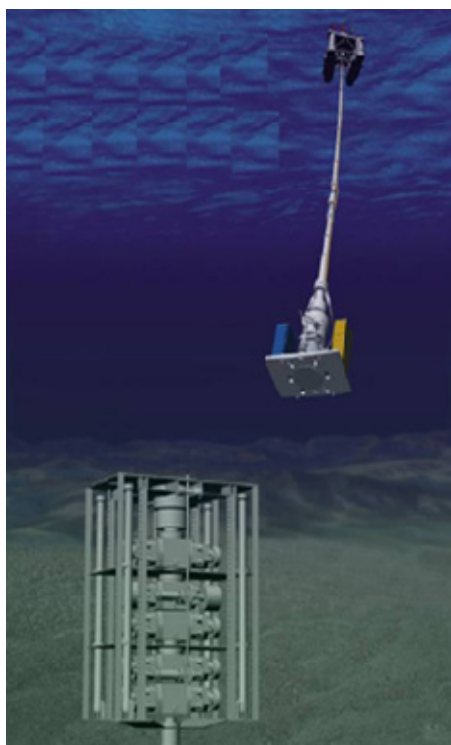


图7 隔水管系统解脱后悬挂航行
Fig.7 Hanging navigation after the release of the riser system

4 深水钻井关键装备

4.1 深水钻井作业平台

深水钻井平台是勘探和开发深海油气的浮动堡垒, 它们在艰难的海洋深处提供了先进技术和设施。中国的深水钻井平台技术在全球范围内取得显著进展, 代表性平台包括“海洋石油981”(Haiyang Shiyou 981)、“蓝鲸1号”(Bluewhale I)以及“蓝鲸2号”(Bluewhale II)等^[6]。

4.1.1 深水半潜式钻井平台

“海洋石油981”是中国首座自主设计和建造的第6代深水半潜式钻井平台。自2012年投入使用以来, “海洋石油981”在南海多个油气田进行深水钻井作业^[53], 其中“深海一号”气田就是由该平台作业发现, 为中国的能源安全作出了重要贡献。

“海洋石油982”钻井平台是中国自主设计和建造的先进深水半潜式钻井平台(见图8), 具备1 500 m作业水深和9 144 m钻井深度的能力。该平台采用四柱半潜式设计, 配备先进的动力定位系统和高功率推进器, 能够自主航行并精准定位。具备抗12级以上台风的能力, 平台在安全性和环保性方面全面升级, 确保全球不同海域的高效作业^[54]。平台采用了国际先进的设计和制造工艺, 展示了中国在高端海洋工程装备制造方面的强大能力。



图8 海洋石油982钻井平台
Fig.8 Haiyang Shiyou 982 Drilling Platform

4.1.2 超深水半潜式钻井平台

“蓝鲸1号”是中国自主设计和建造的先进超深水钻井平台(见图9), 具备3 658 m作业水深和15 250 m钻井深度的能力。该平台采用双钻塔设计和DP3级动力定位系统, 能够在极端海况下进行高效稳定的钻井作业。2017年, “蓝鲸1号”在南海

成功试采可燃冰^[55], 标志着中国在超深水钻井和可燃冰开采技术方面的重大突破, 提升了中国在全球海洋工程领域的竞争力。“蓝鲸2号”是“蓝鲸1号”的姊妹船, 整体设计基本相同。



图9 “蓝鲸1号”钻井平台
Fig.9 Bluewhale 1 drilling platform

4.1.3 “梦想”号大洋钻探船

“梦想”号是中国自主设计建造的顶级大洋钻探船(见图10), 2021年11月30日开工, 2022年12月18日实现主船体贯通, 并于2023年12月18日正式命名和试航。该船总长179.8 m, 宽32.8 m, 续航能力为27 000千米, 自持力可达120 d, 能够在全球各大海域进行作业, 具备11 000 m的钻探深度, 结构设计可抵御16级台风。其配置了全球最大、功能最全的船载实验室, 总面积超过3 km², 包含9个功能实验室及150多台精密仪器设备。“梦想”号采用了10余项关键技术, 能够进行油气钻探和大洋科学钻探, 特别在海底钻探深度和实验设备方面处于全球领先地位。其主要目标之一是钻穿莫霍面, 进入地幔, 探索地幔的物理、化学和生物特性, 推动国际大洋科学研究的发展^[56]。



图10 “梦想”号大洋钻探船
Fig.10 "Mengxiang" ocean drilling ship

4.2 深水钻井关键工具装备

中国在深水油气开发中, 钻井关键工具装备曾长期依靠进口。近年来, 中国海油联合国内企业在部分关键工具装备上取得了大量实质性进展, 这些工具在深水作业中应用效果良好。

4.2.1 随钻测井及导向钻井系统

中海油田服务股份有限公司成功开发了中国首套Drilog随钻测井系统与Wellleader旋转导向钻井系统, 使中国成为全球第2个具备这些核心技术的国家。Drilog系统在随钻声波、随钻测压及随钻探边3大功能上取得了突破, 高速脉冲传输速率提升了24倍。Wellleader系统新增了垂直造斜、高造斜率、近钻头测量和垂直钻井功能, 钻井效率提高了20%。截至2020年年底, 这2套系统在中国国内成功完成了520口井的作业, 累计钻进距离达 50×10^4 m^[5]。

4.2.2 深水表层导管

表层导管是深水浅层钻井的重要结构。中国海油联合山东祺龙海洋石油钢管股份有限公司攻克了表层导钢管体选材、接头连接设计、焊接工艺、吊装结构设计、防转块设计等难题, 已制造了系列相关产品(见图11), 可完全替代国外同类产品, 已应用于中国南海深水井, 单井节约成本超过 40×10^4 元^[52]。



图11 国产深水表层导管
Fig.11 Domestic deep water surface conductor

4.2.3 水下井口

深水水下井口用于连接和支撑防喷器组与套管串, 隔离井下压力, 是井筒完整性管理的重要屏障。中国海油与国内企业如上海霞为石油设备技术服务有限公司和中石化江钻石油机械有限公司等, 成功实现了深水水下井口的国产化, 代表性产品包括SXW-15和KSW-15, 这两款井口的额定压

力为15 000 psi*, 性能达到了国际中等水平, 能够满足常规深水井作业需求^[57]。然而, 对于非常规的深水高温高压井和超深井, 目前仍需依赖国外产品。

4.2.4 水下采油树

浅水水下采油树目前已取得成功, 在渤海湾完成了海试, 验证了系统的安全可靠性。该水下采油树具备模块化设计、多阀系统、高效连接接口和远程操作控制系统, 用于控制和管理海底油气井的生产。该水下采油树总成长宽为3.3 m, 高度仅2.65 m, 整体重量24.8 t, 可适应浅水油气田的开发。目前正在对适应500 m水深的深水水下采油树进行研发, 已在结构设计、机械设计、控制单元等方面取得突破, 相关产品已在东方海域1-1气田成功投入^[57]。

4.2.5 水下应急封井装置

水下应急封井装置是应对井喷事故的关键设备, 同时也标志着国家海洋应急装备研发能力的先进性。该装置融合了机械制造、液压控制、数据监测、信息传输以及水下机器人干预等多项技术, 能够执行关井、分流、压井、分散剂注入和圈闭气体释放等多种功能。其结构上主要由多个阀门和压力控制系统组成, 可在井控问题或其他应急情况下通过远程遥控迅速封闭油气井通道, 有效防止海洋污染^[58]。技术特点包括耐高压和耐腐蚀, 能够在复杂的海底环境中可靠工作。中国于2021年在南海深水区成功海试了首套具有完全自主知识产权的应急封井装置(见图12), 国产化率达到了90.26%, 填补了中国在深水油气应急装备领域的技术空白。该套装置的主要技术参数: 通径480 mm、压力等级105 MPa、最大流量16 000 m³/d、工作水深3 000 m。



图12 国产水下应急封井装置

Fig.12 Domestic underwater emergency capping device

* 非法定计量单位, 1 psi=6.895×10⁻³ MPa

5 未来展望

5.1 促进油气井工程数字化和智能化

随着技术进步, 人工智能(AI)和大数据分析为深水钻井与安全控制技术领域带来前所未有的创新潜力。这些技术在深水钻井中的关键应用:

- (1) 智能优化钻井决策过程。人工智能技术可以通过模式识别和机器学习算法分析历史钻井数据, 预测钻井过程中可能遇到的问题, 如钻头磨损、井壁不稳定等。这种预测能力使得钻井决策更加科学, 有助于规避风险和提高钻井效率。
- (2) 大数据实时监控与分析。大数据技术使得能够实时收集和分析来自钻井现场的大量数据, 包括压力、温度、钻速和其他关键参数。AI算法可以实时处理这些数据, 快速识别异常情况, 及时调整钻井参数或启动应急措施, 从而极大提升钻井安全控制水平。
- (3) 提高井控事件预防与应对能力。通过深度学习和预测模型, AI可以预测井控事件如井喷或井涌的风险, 提出预防措施。此外, AI还可以在井控事件发生时提供快速的解决方案和操作建议, 帮助控制局势。
- (4) 自动化与机器人技术。在深水钻井作业中, AI驱动的自动化技术和水下机器人可以执行危险的或人力难以达到的任务, 如设备检查、维护和修理, 减少人员风险。
- (5) 增强环境保护。AI和大数据还可以监测环境影响, 评估钻井作业对海洋生态的影响。通过实时数据监控, AI可以帮助制定更有效的环境保护措施和应急响应策略。

5.2 加快工程地质一体化融合

明确地质特征是安全高效钻井工程的基础。深水区域地质条件复杂, 工程干扰因素多。工程地质一体化融合将地质科学与工程实践紧密结合, 以优化钻井设计和操作, 从而降低风险并提高钻井效率。工程地质一体化融合可提高钻井安全, 通过提供详尽的地下信息, 帮助预测并应对可能的地质风险, 如断层滑动、井壁坍塌或异常高压, 制定具体的井控策略和应急计划。同时, 地质一体化策略支持实时数据的集成和分析, 包括从钻井现场实时传输的数据。这些数据的综合分析有助于即时调整钻井参数和策略, 以应对井下突发情况和变化, 提高决策的及时性和减少不必要的钻井尝试和错误。

5.3 提高关键装备和工程软件国产化

目前深水水下井口、采油树(采气树)、表层导管等部分装备已逐步完成国产化,正在进一步优化应用。但是相当部分的装备和工程软件尚依赖进口,如隔水管系统、水下防喷器系统、水下生产系统、超高温井下作业工具、智能钻井工具、特殊环境钻井液体系、高规格防腐管材。由于受国外限制,高昂的装备成本、长时间的采购与到货周期、技术服务在敏感区域的缺失,以及潜在的技术封锁,对深水勘探开发活动产生了显著影响。因此,亟需进一步提高关键装备的国产化。此外,目前中国国内深水钻井设计主要依赖Landmark、Drillbench等国外公司软件,国产工程软件不仅缺少部分模块,而且有待完善。

5.4 加强远洋风险控制和应急能力

国内目前作业的深水井都位于南海北部,靠近中国大陆,应急作业能力基本满足。未来面向更广阔的深远海作业,受恶劣环境影响、工程地质经验不足和地理位置限制,深水钻井风险控制和应急能力还欠缺。因此,需要进一步提高风险评估和管理能力,建立高效的实时监控系统,同时与当地政府、救援组织和其他相关方建立良好的合作关系,制定详细的应急响应计划。

6 结束语

从最初的技术跟踪到自主创新,中国已经构建了一套较为完善的深水钻井技术体系,并成功应用于南海等关键深水区域。面对极端深水环境带来的多重挑战,中国深水钻井技术和装备已展现出其成熟度和国际竞争力。随着在超深水、深层、远海“两深一远”区域勘探开发的持续推进,对技术创新和安全环保的要求日益提高,深水钻井技术与装备仍面临重大考验。未来,海洋石油工业需加速推动钻井工程的数字化和智能化,推进工程地质一体化融合,加强关键装备和软件的研发,并提升远洋安全保障能力。这些技术的不断进步将促进相关产业链的发展,推动经济的持续增长,并为全球能源开发提供中国的创新方案和智慧。

参考文献:

- [1] 杨进,傅超,刘书杰,等.超深水浅层建井关键技术创新与实践[J].石油学报,2022,43(10):1500-1508.

- YANG J, FU C, LIU S J, et al. Key technological innovation and practice of well construction in ultra-deepwater shallow formations[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(10): 1500-1508.
- [2] 宫柯.海上油气勘探60年[J].石油知识,2019(6):20-22.
GONG K. 60 years of offshore oil and gas exploration[J]. Petroleum Knowledge, 2019(6): 20-22.
- [3] 杨进,李磊,宋宇,等.中国海洋油气钻井技术发展现状及展望[J].石油学报,2023,44(12):2308-2318.
YANG J, LI L, SONG Y, et al. Current status and prospects of offshore oil and gas drilling technology development in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2308-2318.
- [4] 李中.中国海油油气井工程数字化和智能化新进展与展望[J].石油勘探技术,2022,50(2):1-8.
LI Z. Progress and prospects of digitization and intelligentization of CNOOC's oil and gas well engineering [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(2): 1-8.
- [5] 李中,谢仁军,吴怡,等.中国海洋油气钻完井技术的进展与展望[J].天然气工业,2021,41(8):178-185.
LI Z, XIE R J, WU Y, et al. Progress and prospect of CNOOC's oil and gas well drilling and completion technologies[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 178-185.
- [6] 谢玉洪,刘书杰,杨进,等.深水油气钻探技术装备发展现状与趋势[J].前瞻科技,2023,2(2):22-31.
XIE Y H, LIU S J, YANG J, et al. Development status and trend of deepwater oil and gas drilling technologies and equipment[J]. Science and Technology Foresight, 2023, 2(2): 22-31.
- [7] 徐长贵,赖维成,张新涛,等.中国海油油气勘探新进展与未来勘探思考[J].中国海上油气,2023,35(2):1-12.
XU C G, LAI W C, ZHANG X T, et al. New progress and future exploration thinking of CNOOC oil and gas exploration[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(2): 1-12.
- [8] 刘书杰,吴怡,谢仁军,等.深水深层井钻井关键技术与展望[J].石油钻采工艺,2021,43(2):139-145.
LIU S J, WU Y, XIE R J, et al. Development and prospect of the key technologies for the drilling of deep wells in deep water[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(2): 139-145.
- [9] 温志新,王建君,王兆明,等.世界深水油气勘探形势分析与思考[J].石油勘探与开发,2023,50(5):924-936.
WEN Z X, WANG J J, WANG Z M, et al. Analysis of the world deepwater oil and gas exploration situation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(5): 924-936.
- [10] 蒋德鑫,张厚和,李春荣,等.全球深水-超深水油气勘探历程与发展趋势[J].海洋地质前沿,2022,38(10):1-12.
JIANG D X, ZHANG H H, LI C R, et al. Global deep- and ultra-deep-water oil and gas exploration: Review and outlook[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(10): 1-12.

- [11] 谢玉洪. 南海西部深水区自营油气田勘探开发现状及展望[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(1): 5-7.
XIE Y H. Status and prospect of proprietary oil and gas field exploration and development in deepwater West of South China Sea[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(1): 5-7.
- [12] 刘正礼, 胡伟杰. 南海深水钻完井技术挑战及对策[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(1): 8-12.
LIU Z L, HU W J. Countermeasures and challenges of deepwater drilling and completion technology in South China Sea[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(1): 8-12.
- [13] 米立军, 周守为, 谢玉洪, 等. 南海北部深水区油气勘探进展与未来展望[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 58-65.
MI L J, ZHOU S W, XIE Y H, et al. Deep-water oil and gas exploration in northern South China Sea: Progress and outlook[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 58-65.
- [14] 吴怡, 幸雪松, 庞照宇, 等. 海上勘探开发一体化钻完井关键技术研究与实践[J]. 中国海上油气, 2022, 34(1): 128-133.
WU Y, XING X S, PANG Z Y, et al. Research and application of key technologies of integrated drilling and completion for offshore exploration and development[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(1): 128-133.
- [15] 谢彬, 曾恒一. 我国海洋深水油气田开发工程技术研究进展[J]. 中国海上油气, 2021, 33(1): 166-176.
XIE B, ZENG H Y. Research advancement in offshore deep water oil and gas development engineering technologies in China[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(1): 166-176.
- [16] 姜伟. 中国海洋石油深水钻完井技术[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(1): 1-4.
JIANG W. Deepwater drilling and completion technology of China National Offshore Oil Corporation[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(1): 1-4.
- [17] 谢仁军, 李中, 刘书杰, 等. 南海陵水17-2深水气田开发钻完井工程方案研究与实践[J]. 中国海上油气, 2022, 34(2): 116-124.
XIE R J, LI Z, LIU S J, et al. Research and practice on drilling and completion engineering scheme of LS17-2 deep water gas field development in South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(2): 116-124.
- [18] 谢玉洪. 南海北部陆缘盆地深水区油气勘探新认识及攻关方向[J]. 天然气工业, 2024, 44(1): 13-25.
XIE Y H. New insights and future research focuses on oil and gas exploration in the continental margin deepwater area of the northern South China Sea[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(1): 13-25.
- [19] 卢运虎, 肖先恒, 赵琳, 等. 温度对超深裂缝性地层井壁稳定性的影响[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(2): 160-167.
LU Y H, XIAO X H, ZHAO L, et al. The effect of temperature on stability of borehole wall in ultra-deep fractured formation[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2020, 37(2): 160-167.
- [20] 金衍, 薄克浩, 张亚洲, 等. 深层硬脆性泥页岩井壁稳定力学化学耦合研究进展与思考[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 159-169.
JIN Y, BO K H, ZHANG Y Z, et al. Advancements and considerations of chemo-mechanical coupling for wellbore stability in deep hard brittle shale[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 159-169.
- [21] 卢运虎, 金衍, 夏阳, 等. 超深硬岩地层井壁失稳的动力学分析模型: 本征频率和高应力的影响[J]. 力学与实践, 2023, 45(5): 1033-1043.
LU Y H, JIN Y, XIA Y, et al. Dynamic analysis model of wellbore instability in deep tight sandstone: Effect of intrinsic frequency and high stress[J]. Mechanics in Engineering, 2023, 45(5): 1033-1043.
- [22] ZHANG X, LU Y H, JIN Y, et al. An adaptive physics-informed deep learning method for pore pressure prediction using seismic data[J]. Petroleum Science, 2024, 21(2): 885-902.
- [23] 张祯祥. 深水钻井安全密度窗口精确预测研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
ZHANG Z X. Accurate prediction of safe mud weight window in deepwater drilling[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2022.
- [24] 杨进. 深水油气井表层导管下入深度计算方法[J]. 石油学报, 2019, 40(11): 1396-1406.
YANG J. Calculation method of surface conductor setting depth in deepwater oil and gas wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(11): 1396-1406.
- [25] FU C, YANG J, LONG Y, et al. Calculation method of deep-water surface conductor bearing capacity based on jetting operation parameters[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 234: 212625.
- [26] 周波, 杨进, 周建良, 等. 深水钻井喷射下导管排量设计方法[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(3): 21-26.
ZHOU B, YANG J, ZHOU J L, et al. A jetting flow rate design method for conductor installation through jetting in deepwater drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(3): 21-26.
- [27] 许云锦, 杨进, 周波, 等. 深水钻井喷射法安装表层导管极限下入深度确定[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(5): 553-557.
XU Y J, YANG J, ZHOU B, et al. Research on limit depth of the surface conductor by jetting method in deepwater drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(5): 553-557.
- [28] YANG J, MENG W, YAO M B, et al. Calculation method of riser top tension in deep water drilling[J]. Petroleum

- Exploration and Development, 2015, 42(1): 119-122.
- [29] 周建良, 许亮斌. 深水钻井隔水管关键技术研究进展[J]. 中国海上油气, 2018, 30(4): 135-143.
ZHOU J L, XU L B. Research progress of key technologies for deep water drilling risers[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(4): 135-143.
- [30] 孙巧雷, 李中, 王尔钧, 等. 深水测试管柱与隔水管的横向承载特性[J]. 天然气工业, 2020, 40(12): 106-115.
SUN Q L, LI Z, WANG E J, et al. Transverse bearing behaviors of strings and risers in deepwater tests[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(12): 106-115.
- [31] 王宴滨, 高德利, 王金铎, 等. 横流向涡激-参激耦合振动下深水钻井隔水管疲劳损伤预测[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(6): 119-126.
WANG Y B, GAO D L, WANG J D, et al. Fatigue damage prediction of deepwater drilling riser under cross-flow vortex-parametric-coupled vibration[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2022, 46(6): 119-126.
- [32] 高德利, 王宴滨. 海洋深水钻井力学与控制技术若干研究进展[J]. 石油学报, 2019, 40(增刊2): 102-115.
GAO D L, WANG Y B. Some research progress in deepwater drilling mechanics and control technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S2): 102-115.
- [33] 傅超, 杨进, 刘华清, 等. 多维度深水浅层建井方式优选方法研究[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(3): 40-46.
FU C, YANG J, LIU H Q, et al. Multi-dimensional selection method for well construction in shallow formations of deepwater[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(3): 40-46.
- [34] 杨进, 李文龙, 胡志强, 等. 深水钻井水下井口稳定性研究进展[J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 124-130.
YANG J, LI W L, HU Z Q, et al. Research progresses on subsea wellhead stability of deep water drilling[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(4): 124-130.
- [35] 张建平, 庞达, 徐佳俊, 等. 深水钻井表层导管喷射下入井口稳定性分析[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(增刊1): 101-103.
ZHANG J P, PANG D, XU J J, et al. Wellhead stability analysis of surface casing running for deepwater drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(S1): 101-103.
- [36] 杨进, 张百灵, 周波, 等. 深水浅层气地质灾害声波识别预测技术[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(1): 143-146.
YANG J, ZHANG B L, ZHOU B, et al. Geological disaster acoustic wave identification and prediction technology of deepwater shallow gas[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(1): 143-146.
- [37] 吴怡, 周建良, 张天玮, 等. 深水浅层钻井地质灾害调查与识别技术[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2023, 25(1): 1-9, 36.
WU Y, ZHOU J L, ZHANG T W, et al. Investigation and identification technology of geological hazards in deep water shallow drilling[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2023, 25(1): 1-9, 36.
- [38] 范翔宇, 帅竣天, 李枝林, 等. 油气井早期溢流监测技术研究现状及展望[J]. 钻采工艺, 2020, 43(3): 23-26.
FAN X Y, SHUAI J T, LI Z L, et al. Research status and prospect on early kick detection technology of oil and gas wells[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(3): 23-26.
- [39] 陈平, 马天寿. 深水钻井溢流早期监测技术研究现状[J]. 石油学报, 2014, 35(3): 602-612.
CHEN P, MA T S. Research status of early monitoring technology for deepwater drilling overflow[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(3): 602-612.
- [40] 许玉强, 金衍, 管志川, 等. 深水钻井气侵溢流发展规律及隔水管气侵监测优势[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(1): 60-67.
XU Y Q, JIN Y, GUAN Z C, et al. Evolution of gas kick and overflow in wellbore during deepwater drilling and advantage analysis of early gas kick detection in riser[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2019, 43(1): 60-67.
- [41] 金学义, 董海涛, 何轲, 等. 中国深水钻井隔水管监测技术研究进展[J]. 中国海上油气, 2021, 33(5): 136-147.
JIN X Y, DONG H T, HE K, et al. Research progress of China's deep water drilling riser monitoring technology[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(5): 136-147.
- [42] 许玉强, 管志川, 庞华, 等. 深水钻井最大允许气侵溢流量的计算方法[J]. 天然气工业, 2016, 36(7): 74-80.
XU Y Q, GUAN Z C, PANG H, et al. A calculation method of the maximum allowable gas invasion overflow in deepwater drilling[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(7): 74-80.
- [43] 邸建伟, 张贺恩, 李晶, 等. 深水钻井自反馈动态压井工业用机设计与应用[J]. 石油工程建设, 2020, 46(增刊1): 195-201.
DI J W, ZHANG H E, LI J, et al. Design and application of self-feedback dynamic well killing machine for deepwater drilling[J]. Petroleum Engineering Construction, 2020, 46(S1): 195-201.
- [44] 孙长利, 苗典远, 李允智, 等. 深水救援井动态压井参数优化设计方法[J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 131-139.
SUN C L, MIAO D Y, LI Y Z, et al. Optimal design method for dynamic killing parameters of deep water rescue well[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(4): 131-139.
- [45] 李中. 中国海油深水钻井技术进展及发展展望[J]. 中国海上油气, 2021, 33(3): 114-120.
LI Z. Progress and prospect of deepwater drilling technology in CNOOC[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(3): 114-120.

- 114-120.
- [46] 赵新亮. 动态压井钻井的应用技术研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
ZHAO X L. Research on the application technology of dynamic kill well drilling[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019.
- [47] 张波, 罗方伟, 郑钰山, 等. 环形防喷器应急关闭后井内套管柱上顶机理[J]. 石油机械, 2022, 50(7): 43-48.
ZHANG B, LUO F W, ZHENG Y S, et al. Mechanism of casing string up-lift after emergency shut-in of annular blowout preventer[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(7): 43-48.
- [48] 张大鹏, 于茜, 孟凡铁, 等. 超深钻井专用剪切防喷器及控制装置的研制[J]. 内蒙古石油化工, 2022, 48(6): 9-14.
ZHANG D P, YU Q, MENG F T, et al. Manufacture of special scissors blowout preventer and its control device for ultra deep drilling[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2022, 48(6): 9-14.
- [49] 宋宇, 杨进, 何藜, 等. 基于隔水管受力分析的深水钻井平台防台风措施优选[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(1): 147-150.
SONG Y, YANG J, HE L, et al. Preferred anti-typhoon measures for deepwater drilling platform based on riser force analysis[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(1): 147-150.
- [50] 田得强, 李中, 许亮斌, 等. 深水钻井隔水管-生产立管群干涉振动分析[J]. 石油机械, 2022, 50(7): 63-71.
TIAN D Q, LI Z, XU L B, et al. Interference vibration analysis of drilling riser-production riser clusters in deep water[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(7): 63-71.
- [51] 毛良杰, 付煜煌, 曾松. 正常连接与悬挂撤离工况下深水钻井隔水管动力特性与安全分析[J]. 船舶力学, 2022, 26(2): 250-263.
MAO L J, FU D H, ZENG S. Dynamic characteristics and safety analysis of deep water drilling riser under normal connected condition and hang-off evacuation condition[J]. Journal of Ship Mechanics, 2022, 26(2): 250-263.
- [52] 张来斌, 谢仁军, 殷启帅. 深水油气开采风险评估及安全控制技术进展与发展建议[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 55-65.
ZHANG L B, XIE R J, YIN Q S. Technical progress and development suggestions for risk assessment and safety control of deep-water oil and gas exploitation[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 55-65.
- [53] 章卫兵, 王一端, 闫建文, 等. 半潜式钻井平台的代表作: “海洋石油981”[J]. 石油知识, 2021(2): 10-11.
ZHANG W B, WANG Y D, YAN J W, et al. The representative of semi-submersible drilling platform: “Offshore oil 981”[J]. Petroleum Knowledge, 2021(2): 10-11.
- [54] 张光明, 朱明, 于爽. 深水新星 缘何堪称最先进?: 实地探访深水钻井装备“海洋石油982”[J]. 机电设备, 2017, 34(5): 61-62.
ZHANG G M, ZHU M, YU S. Why is deepwater nova the most advanced?: Field visit to deepwater drilling equipment “offshore oil 982”[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2017, 34(5): 61-62.
- [55] 伊然. 试采可燃冰的大国重器: “蓝鲸1号”[J]. 石油知识, 2017(4): 4-5.
YI R. “Blue whale No.1”, a big country’s heavy instrument for testing combustible ice[J]. Petroleum Knowledge, 2017(4): 4-5.
- [56] 黄叙浩. “梦想”号来了! 我国首艘大洋钻探船南沙试航[N]. 南方日报, 2023-12-19(A2).
HUANG X H. Mengxiang is here! China’s first ocean drilling vessel conducted sea trials in Nansha[N]. Nanfang Daily, 2023-12-19(A2).
- [57] 李中. 中国海油“深海一号”大气田钻完井关键技术进展及展望[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 88-94.
LI Z. Progress and prospect of key technologies for drilling and completion of “deep sea No.1” gas field of CNOOC[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 88-94.
- [58] 苗典远, 李雪雄, 杨欣雨, 等. 水下应急封井器的现状与发展[J]. 海洋工程装备与技术, 2019, 6(增刊1): 181-185.
MIAO D Y, LI X X, YANG X Y, et al. Overview of current subsea capping stack and its development[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2019, 6(S1): 181-185.

(编辑: 王环 张凤娟)