

引文: 黄熠, 罗鸣, 马传华, 等. 超深水油气钻完井关键装备现状及技术展望[J]. 天然气工业, 2025, 45(6): 150-160.

HUANG Yi, LUO Ming, MA Chuanhua, et al. Status and technological prospect of key equipment for ultra-deepwater oil and gas well drilling and completion[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(6): 150-160.

超深水油气钻完井关键装备现状及技术展望

黄熠^{1,2,3} 罗鸣^{1,2,3} 马传华^{1,2,3} 代锐^{1,2} 黄洪林^{1,2,3} 杨宇鹏^{1,2}

1. 中海石油海南能源有限公司 2. 中海石油(中国)有限公司海南分公司 3. 海南省深海深层能源工程重点实验室

摘要: 全球超深水油气资源主要集中在巴西桑托斯盆地、美国墨西哥湾、圭亚那盆地以及中国南海琼东南盆地等地区。近年来, 中国海洋油气勘探开发实现了从浅水到深水、从深水到超深水的重大跨越, 中国海洋油气钻探开发已迈入超深水行列。超深水油气资源开发是保障国家能源安全和实现能源转型的现实需要, 目前南海琼东南盆地已成为中国最具潜力的超深水油气资源开发区域。为对标国内外深水关键装备的技术差距, 明确技术发展方向, 系统梳理了中国超深水钻井平台、精细控压钻井装备、旋转导向工具、水下生产系统和水下应急封井器的装备和技术现状, 并与国际领先技术进行了对比分析, 指出了中国超深水油气钻完井关键装备的发展方向。研究结果表明: ①复杂的海洋环境、高风险作业条件和装备技术的进口依赖仍是制约超深水油气全面自主开发的重要瓶颈; ②超深水油气开发面临复杂海洋环境、窄压力窗口及高温高压等多重挑战, 核心钻完井装备的自主化、智能化和高效化发展是关键; ③未来需加速关键装备国产化, 构建智能化开发体系, 创新适应极端环境的新型装备, 并强化环保技术研发, 积极构建自主、高效、绿色的开发能力, 进而实现油气的绿色可持续发展。结论认为, 通过技术创新和装备升级, 可全面提升超深水油气资源的开发能力, 以中国南海为核心的超深水油气区块开发取得了历史性突破, 展现了中国在超深水钻完井领域的技术进步和实践能力, 并为全球超深水油气开发提供了技术示范和实践经验。

关键词: 超深水; 油气开发; 钻完井; 关键装备; 装备国产化; 智能化发展; 绿色可持续发展

中图分类号: TE52; TE928

文献标识码: A

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2025.06.013

Status and technological prospect of key equipment for ultra-deepwater oil and gas well drilling and completion

HUANG Yi^{1,2,3}, LUO Ming^{1,2,3}, MA Chuanhua^{1,2,3}, DAI Rui^{1,2}, HUANG Honglin^{1,2,3}, YANG Yupeng^{1,2}

(1. CNOOC Hainan Energy Co. Ltd., Haikou, Hainan 570100, China; 2. Hainan Branch of CNOOC Co., Ltd., Haikou, Hainan 570100, China; 3. Hainan Key Laboratory of Deepwater Deep Formation Energy Engineering, Chengmai, Hainan 571900, China)

Natural Gas Industry, Vol.45, No.6, p.150-160, 6/25/2025. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Global ultra-deepwater oil and gas resources are mainly distributed in the Santos Basin of Brazil, the Mexico Gulf of US, the Guiana Basin, and the Qiongdongnan Basin of South China Sea. In recent years, offshore oil and gas exploration and development in China has achieved great leap from shallow water to deep water and from deep water to ultra-deep water, and China's offshore oil and gas drilling and development has stepped into the field of ultra-deep water. The development of ultra-deepwater oil and gas resources is a crucial approach to ensuring national energy security and achieving energy transition. At present, the Qiongdongnan Basin of South China Sea has become China's most promising region of ultra-deepwater oil and gas resource development. In order to benchmark the technological gap between domestic and foreign key deepwater equipment and point out the technological development directions, this paper systematically reviews China's equipment and technological status of ultra-deep water drilling platforms, managed pressure drilling equipment, rotary steerable tools, subsea production systems, and subsea blowout preventers, and compares them with international leading technologies. In addition, the development directions of key equipment for ultra-deepwater oil and gas well drilling and completion in China are pointed out. The following results are obtained. First, complex marine environments, high-risk operation conditions, and dependence on imported equipment and technologies are still main bottlenecks restricting the comprehensive and independent development of ultra-deepwater oil and gas. Second, facing multiple challenges such as complex marine environments, narrow pressure windows, and high-temperature, high-pressure conditions, the key to the development of ultra-deepwater oil and gas is the independent, intelligent and efficient development of core drilling and completion equipment. Third, in the future, it is necessary to accelerate the localization of key equipment, construct intelligent development systems, and innovate new equipment adaptive to extreme environments, while strengthening the research and development of environmental protection technologies and actively building independent, efficient and green development capacity to achieve green and sustainable development of oil and gas. In conclusion, technological innovation and equipment upgrading can overall enhance the capability of developing ultra-deepwater oil and gas resources. The historic breakthrough in the development of ultra-deep water oil and gas blocks with the South China Sea as the core exhibits China's technological progress and practical capability in the field of ultra-deep water well drilling and completion, and provides technical demonstration and practical experience for global ultra-deepwater oil and gas development.

Keywords: Ultra-deepwater; Oil and gas development; Well drilling and completion; Key equipment; Equipment localization; Intelligent development; Green and sustainable development

基金项目: 国家重点研发计划项目“3 000 米级深海油气钻探关键技术与装备研究”(编号: 2022YFC2806500)、中国海洋石油有限公司“十四五”重大科技项目“深水/超深水复杂井安全高效钻完井关键技术”(编号: KJGG2022-0201)。

作者简介: 黄熠, 1973 年生, 正高级工程师, 博士; 现任中海石油(中国)有限公司海南分公司副总经理兼总工程师, 主要从事海上油气井钻完井技术研究与管理工作。地址: (570100) 海南省海口市秀英区长滨三路 6 号。ORCID: 0009-0009-2314-9709。E-mail: huangyi@cnooc.com.cn

通信作者: 黄洪林, 1994 年生, 工程师, 博士; 主要从事油气井岩石力学与渗流力学方面的研究工作。地址: (570100) 海南省海口市秀英区长滨三路 6 号。E-mail: huanghl24@cnooc.com.cn

0 引言

随着全球能源需求的增长和绿色能源转型的推进,深海和超深海油气资源的开发正逐渐成为全球能源供给的重要补充途径^[1]。按照国际石油界的共识,海洋油气开发海域水深超过 500 m 的区域,称为深水油气田;而水深超过 1 500 m 的区域称为超深水油气田^[2]。作为地球上尚未充分开发的油气富集区域,超深水区域蕴藏着巨大的资源潜力,但其开发面临着极高的技术和经济挑战。与陆地和浅水区域相比,超深水油气开发需要应对更复杂的海洋环境、更高的温压条件以及更严苛的作业要求,对钻完井技术和装备的性能提出了全新标准,尤其是装备的智能化和高效化成为行业发展的重点^[3]。

全球超深水油气主要集中在巴西桑托斯盆地、美国墨西哥湾、圭亚那盆地和中国南海琼东南盆地等地区,共计约 1 400 个油气田,可采储量合计 408×10^8 t 油当量^[4]。不同海域的深水—超深水油气资源在水深、温度压力、井深等关键参数上存在显著差异。巴西桑托斯盆地水深大多在 2 000~3 000 m,温度可达 100 ℃ 以上,压力达到 150 MPa 以上;美国墨西哥湾水深通常小于 2 500 m,尽管水深相对较浅,但压力和温度仍然较大,温度可达到 120 ℃ 左右,压力约为 140 MPa,给钻井和装备的设计带来了巨大挑战。中国南海琼东南盆地超深水油气田水深小于 2 600 m,尽管水深与其他区域相似,但由于南海台风频发,这对装备的抗风浪能力和动态稳定性要求更高^[5-6]。

目前,中国已成功自主完成 40 余口超深水气井钻完井作业,最大水深达 2 600 m,最大井深达 6 000 m。其中,超深水气田陵水 17-2、陵水 25-1 已顺利投产,累计生产天然气超过 100×10^8 m³;超深水超浅层气田陵水 36-1 的勘探发现将被视为“灾害气”的浅层气转化为具有商业价值的清洁能源^[7]。中国海洋油气勘探开发实现了从浅水到深水、从深水到超深水的重大跨越,中国海洋油气钻探已迈入超深水行列^[8]。

然而,与国际领先技术水平相比,中国在核心装备研发方面仍存在一定差距。复杂的海洋环境、高风险的窄密度窗口以及高温高压等因素使得超深水油气开发面临一系列技术瓶颈^[9]。特别是关键钻完井装备的自主化能力不足,制约了中国深海油气开发的效率、安全性和经济性。因此,加速装备的国产化、智能化和高效化发展,成为突破超深水油气开发瓶

颈的重要途径。

笔者从超深水油气钻完井关键装备的现状出发,重点分析了钻井平台、精细控压钻井技术、水下生产系统、旋转导向系统和水下应急封井器的发展与应用,并对比国际先进技术,全面梳理了中国在该领域的技术优势与短板。在此基础上,提出未来发展方向,包括加速关键装备国产化,构建智能化开发体系,研发适应复杂极端环境的新型装备以及强化环保技术研发,以推动超深水油气开发的绿色可持续发展。

1 超深水油气钻完井面临的挑战

1.1 海洋环境恶劣,应急响应处置时间窗口短

超深水区域的海洋环境极其复杂,恶劣条件对钻完井作业提出了严峻挑战。离岸远、海水深的特点使得设备维护和应急资源调配困难,作业区域常面临台风、内波流等极端自然威胁。一旦发生突发事件,应急响应时间极短,而人员设施高度集中,事故极易引发连锁效应,进一步增加了安全管理的难度。如果处置不当,可能造成严重的人员伤亡、环境污染和巨额经济损失。2010 年发生在墨西哥湾的“深水地平线”事故正是因井控失效和应急管理滞后导致平台爆炸,在短时间内酿成严重灾难,造成 11 人死亡、大量原油泄漏入海,产生长达 87 天的环境危害,成为全球能源行业的警示性案例^[10]。

中国南海超深水油气开发同样面临恶劣海洋环境的严峻挑战,尤其是南海台风季节长、频次高、路径复杂,对钻完井作业的安全威胁极大。此外,南海内波活动频繁,振幅高达 200 m,流速达 2 m/s,对钻井平台的定位和井控安全带来极大隐患^[11]。在这些条件下,突发事件的应急处置窗口极短,需要更高效的预案和先进设备支持,以最大限度降低潜在风险和损失。

1.2 地层安全压力窗口窄,井控风险高

相比陆地和浅水钻完井,超深水钻井难度显著增加。随着水深增加,海底地层上覆岩层压力降低,导致岩层承压能力不足,地层安全密度窗口急剧变窄,井涌余量下降,井底压力控制难度显著加大,极易发生溢流或漏失等井下复杂,井控风险极高^[12]。中国自营超深水油气田中,南海超深水钻完井已钻遇多次地层压力窗口小于 0.06 g/cm³ 地层。如南海东部 LW21-1 区块,水深为 2 451 m,Ø311.2 mm 井段安全密度窗口仅为 0.05 g/cm³,钻井期间出现井漏,累

计漏失钻井液 57 m^3 , 造成 12.75 h 非生产时间^[13]。陵水 25-1 气田储层上覆薄弱层发育, 安全窗口迅速收窄, 产生“上漏下溢”的复杂溢漏共存问题^[14]。同时, 极窄密度窗口地层钻井对精细控压钻井设备的性能也提出了极大挑战^[15-16]。

1.3 井下温压环境复杂, 对设备性能和操作精度要求高

在超深水钻井过程中, 通常伴随着极高的地层压力和温度变化, 对设备性能和操作精度造成多重影响。同时, 超深水区域地质结构复杂, 密度窗口极窄, 砂粒冲刷和腐蚀性流体对设备的磨损显著增强, 加之超深水作业位置远离陆地, 设备维护和应急能力受到极大限制^[17]。这些复杂条件对关键装备和技术的性能要求显著提升。如防喷器 (BOP) 需具备超高压等级 (103 MPa 以上) 和耐高温密封性能, 并配备实时监测与远程控制功能, 以保障井控安全^[18]; 旋转导向系统需要在高温高压条件下具备更高的稳定性和精准性, 以实现复杂地层中井眼轨迹的高效控制; 精细控压钻井技术必须精准控制压力, 通过智能监测和动态调整应对密度窗口收窄的难题; 水下生产系统需采用高强度耐腐蚀材料设计, 并具备模块化维修能力, 以适应长期使用和极端温差环境^[19-20]; 防砂工具则需高精度过滤和较强的耐磨性能, 以抵抗高温高压条件下的砂粒冲刷和设备堵塞; 水下应急封井器要求具有快速响应和高压封堵能力, 并结合水下机器人 (ROV) 技术实现深海复杂环境中的远程操控^[11]。而这些关键装备和技术的优化与协同应用是保障超深水钻井作业安全和效率的核心基础。

2 超深水油气钻完井关键装备发展现状

超深水油气开发的不断推进, 对钻完井作业的安全性、高效性和精准性提出了更高要求。包括钻井平台、精细控压钻井装备、旋转导向系统、水下生产系统以及水下应急封井器等关键装备的发展成为提升作业能力的重要支撑。这些装备在深水复杂环境中的技术突破, 为超深水油气资源开发提供了有力保障。

2.1 钻井平台

为了提高作业效率, 超深水钻井主要采用具备自航能力的钻井船 (Drillship) 和半潜式钻井平台 (Semi-Submersible Rig)。钻井船和半潜式钻井平台

在结构、稳定性、机动性和适用环境上有明显的不同。钻井船主要包括船体、锚泊或动力定位系统 (DP-3) 和自航系统。虽然钻井船存在甲板面积小、受海洋环境因素影响大等缺点, 但其具有机动性好、自航能力强、移动灵活和停泊简单等优点, 其适用水深可达 $3\,600 \text{ m}$ ^[21]。半潜式钻井平台通过数个圆形或方形截面的立柱与下部浮箱连接而成的主体支撑上部模块, 具有水线面面积小、抗风浪能力强、运动性能好、甲板面积和可变载荷大等特点, 适用水深可达 $3\,000 \text{ m}$ ^[22]。

目前, 钻井船主要集中在 Transocean 和 Ocean Rig 等国外公司, 作业主要在墨西哥湾及巴西海域。钻井船普遍配备双井架, 能够进行双线作业, 极大提高了作业效率。Deepwater Atlas、Deepwater Titan 和 Ocean Rig Apollo 钻井船均具备 $3\,600 \text{ m}$ 最大水深和 $12\,000 \text{ m}$ 最大井深的作业能力, 但在防喷器配置和补偿器性能方面各具特色。Deepwater Atlas 和 Deepwater Titan 是全球仅有的配备 138 MPa 防喷器的第八代钻井船 (图 1), 两者均采用 NOV 多路控制系统, 具备“死控”系统、自动剪切功能、声学备份和 ROV 干预功能, 展现出高效且安全的井控能力。在补偿性能上, 两者均具备 $1\,497 \text{ t}$ 的锁定能力和 680 t 的补偿能力, 行程为 7.6 m , 能够适应高压井控需求。相比之下, Ocean Rig Apollo 配置 NOV Shaffer NXT 防喷器, 额定压力为 103 MPa , NOV 第 5 代 MUX 控制舱提供了高效的控制功能。在补偿能力方面, Ocean Rig Apollo 的主补偿器额定载荷为 $1\,134 \text{ t}$, 辅助补偿器为 907 t , 更适合中等负载作业。总体来看, Deepwater Atlas 和 Deepwater Titan 在防喷器压力和补偿能力上表现更优, 适合应对高压、复杂井况 (表 1)。



a. Deepwater Atlas

b. Deepwater Titan

图 1 钻井船照片

半潜式钻井平台更倾向于长期在特定区域内作业, 如挪威北海和中国南海。它们以稳定性为主要优势, 特别适合极端海洋环境和长时间复杂钻井作业。海洋石油 981 和 982 是国内作业量较大的第六代超深水半潜式钻井平台 (图 2)。其中, 海洋石油 981 的

表 1 3 艘代表性钻井船及其关键参数表

名称	最大作业水深 /m	最大作业井深 /m	防喷器配置		补偿器
			类型	控制系统	
Deepwater Atlas	3 600	12 000	1 套 6 闸板 NOV 防喷器（138 MPa），以及 1 套 7 闸板 NOV 防喷器（103 MPa）；第二套防喷器配有独立的测试控制系统，同时主防喷器正在部署	NOV 多路控制系统，配有“死控”系统、自动剪切功能、声学备份系统和 ROV 干预功能	额定能力：锁定状态为 1 497 t，补偿状态为 680 t 行程：7.6 m
Deepwater Titan	3 600	12 000	2 套 6 闸板 NOV 防喷器（138 MPa），由 3 套双闸板组件组成。第二套防喷器配有独立的测试控制系统，同时主防喷器正在部署	NOV 多路控制系统，配有“死控”系统、自动剪切功能、声学备份系统及 ROV 干预功能	额定能力：锁定状态为 1 497 t，补偿状态为 680 t 行程：7.6 m
Ocean Rig Apollo	3 600	12 000	7 闸板 NOV 防喷器（103 MPa）	NOV 第 5 代 MUX 控制舱	主补偿器：NOV CMC-E， 额定载荷为 1 134 t 辅助补偿器：NOV CMC， 额定载荷为 907 t



a. 海洋石油 981 b. 海洋石油 982

图 2 海洋石油钻井平台照片

最大作业水深为 3 000 m，井深为 10 000 m，显著优于海洋石油 982 的 1 800 m 和 9 000 m，覆盖更深水域和复杂井况。两者均配备 103 MPa 的高压闸板防喷器和 69 MPa 的万能防喷器，可应对高温高压地层，具备良好的适应性。补偿系统方面，均采用张力器液缸，具备 15 m 行程和毫米级精度，其中 981 平台的负荷能力达 1 524 t，远高于 982 平台的 1 086 t，更能有效应对南海强内波和管柱张力波动等复杂工况。此外，海洋石油 981 采用 ACCUM 控制系统，响应更快，具备更高的作业安全性和稳定性。相比之下，蓝鲸一号作为中国目前最先进的半潜式钻井平台，综合性能进一步提升。其最大作业水深达 3 658 m，最大钻井深度达到 15 240 m，远超海洋石油 981 和 982，覆盖更广阔的深海区域。蓝鲸一号配备 7 闸板防喷器，保持 103 MPa 的高压防喷能力，同时采用双井架结构，作业效率可提升约 30%^[23]。

2.2 精细控压钻井装备

精细控压钻井装备是保障深海油气开发安全高效的重要手段，其发展水平直接关系到钻井作业的精准性和可靠性^[24-25]。深水 / 超深水精细控压钻井技术因作业平台的特殊结构和隔水管系统的配套

需求^[26]，与浅水控压钻井存在显著差异。根据旋转控制头（Rotating Control Device, RCD）的安装位置，深水控压钻井系统可分为两种配置形式：装于隔水管之上（Above Tension Ring, ATR）和装于隔水管之下（Below Tension Ring, BTR）^[27]。其中，ATR 形式会因平台升沉补偿能力和承压能力的限制，对作业系统性能产生较大影响，而深水区块通常优先选择装于隔水管之下（BTR）的配套形式（图 3）。这种配置不仅能有效减轻平台运动对钻井压力控制的干扰，还能够优化设备的承压性能，提升作业稳定性。

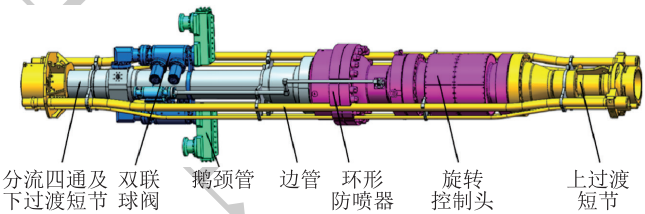


图 3 深水控压钻井 BTR 旋转控制头管串典型结构图

根据旋转控制头管串配套方式，深水控压钻井装备可分为一体式和分体式。一体式旋转控制头结构紧凑，管串重量较轻，适用于高压高温及复杂作业环境，支持更高的工作压力和转速，且可实现动态实时校正，但维护和操作较为复杂，设备成本较高，且在某些特殊场景下灵活性不足。分体式旋转控制头则采用模块化设计，操作便捷，便于安装和维护，适用于常规深水作业和复杂地层，具有较高的压力控制精度，但整体设备较重，可能影响灵活性，且在极端高温高压条件下性能不如一体式设备。

深水 / 超深水控压钻井系统对设备可靠性要求高，现阶段全球仅有少数几个大型国际油田服务公

司有能力提供整套控压钻井系统和技术服务。他们在精细控压钻井装备领域拥有较为成熟的技术和丰富的作业经验，其设备在旋转控制头的设计、压力控制精度以及密封方式等方面体现了显著的技术优势（表 2）。威德福（Weatherford）凭借其市场占有率和丰富的作业经验，通过分体式旋转控制头和被动密封技术，提供了稳定的设备性能，支持 14.0 MPa 的工作压力和 ± 0.20 MPa 的精度，适用于常规深水作业。哈里伯顿（Halliburton）与 Oil States 联合推出的一体式旋转控制头减轻了管串重量，并结合高精度控制软件，实现与井下随钻压力测量数据的实时动态校正，支持高达 17.5 MPa 的工作

压力和 250 r/min 的最高转速，适合高温高压条件的复杂作业。斯伦贝谢（Schlumberger）以分体式旋转控制头设计提升了设备操作便捷性，其分体式设备以 ± 0.20 MPa 的压力精度支持复杂地层的窄压力窗口作业。国民油井华高（National Oilwell Varco, NOV）则通过主动密封技术优化了安装和回收流程，在 14.0 MPa 的工作压力下实现了高效的作业能力，适合快速响应场景。这些公司在深水和超深水控压钻井装备中的技术积累，为全球油气开发提供了多样化的解决方案，并将在未来进一步推动智能化和高效化技术的发展，以满足更复杂地层和更严苛环境的需求。

表 2 代表性深水精细控压钻井装备的性能参数表

公司名称	旋转控制头管串 配套方式	旋转控制头 密封方式	工作压力 / MPa	工作温度 / ℃	压力控制精度 / MPa	流量控制 精度	最高转速 / (r · min ⁻¹)
威德福	分体式	被动	14.0	4 ~ 82	± 0.20	0.1%	200
哈里伯顿 + Oil States	一体式	被动	17.5	4 ~ 82	± 0.20	0.1%	250
斯伦贝谢	分体式	被动	17.5	10 ~ 87	± 0.20	0.1%	200
国民油井华高	分体式	主动	14.0	4 ~ 82	± 0.35	0.1%	200

国内深水 / 超深水精细控压钻井系统正处于攻关阶段，由中海石油（中国）有限公司海南分公司牵头的深水精细控压钻井装备国产化研制项目有望在 2025 年完成海上试验并投入使用。这一系统的研发将填补国内深水 / 超深水钻井技术领域的空白，为中国深水 / 超深水油气资源的自主开发提供强有力的技术支持。同时，国产系统在隔水管配套、实时监控与控制软件等核心环节的突破，也有望进一步降低深水 / 超深水钻井的技术和经济门槛。

2.3 旋转导向系统

旋转导向系统（Rotary Steerable System, RSS）是一种先进的钻井技术，其目的是通过实时调整井眼轨迹，实现更高效、更精准的钻井操作^[28]。近年来，其性能提升和应用场景不断拓展，推动了复杂井的高效钻井^[29]。目前，全球旋转导向系统的研发主要是斯伦贝谢、贝克休斯、哈里伯顿和中国海油^[30]（表 3）。

斯伦贝谢的 PowerDrive 系列旋转导向系统以高造斜能力和多样化适用场景著称（图 4）。其中，PowerDrive Archer 混合式系统可实现 15° ~ 18° /30 m 的造斜率，特别适合高角度和大位移井开发。相比之下，贝克休斯的 AutoTrak 系列可以提供更广泛的适用范围，AutoTrak eXact 在复杂井眼和高速钻井中表现突出，其造斜率达到 10° ~ 12° /30 m。此外，哈

里伯顿的 Geo-Pilot 和 iCruise 系统则在耐温性和智能化方面表现优异，尤其是 iCruise，其 400 r/min 的高速钻井能力和精细化地质导向能力更适用于复杂地层^[31]。

中国海油的自主研发成果“璇玑”系统（Welleader 和 W-Pivot）近年来也取得重要突破。其推靠式和指向式设计均已达到国际主流水平。模块化设计增强了其适用性和经济性，为中国海洋油气资源开发提供了技术支撑。然而，与国际领先技术相比，“璇玑”系统在造斜能力、高温环境适应性和智能化水平方面仍有进一步的提升空间。在造斜能力方面，“璇玑”系统的造斜率达到 12° /30 m，接近国际主流，但与斯伦贝谢的 PowerDrive Archer 15° ~ 18° /30 m 的造斜率相比仍显不足，尤其在高角度、大位移井开发中存在局限。在高温环境适应性方面，其耐温能力为 150℃，已达到主流水平，但在更高温条件下仍需优化，以拓展应用场景。

2.4 水下生产系统

自 1947 年美国第一次提出水下井口的概念以来，水下生产系统水深和回接距离不断刷新，目前应用水深达到 2 748 m，回接距离达到 149.7 km。水下生产系统关键装备基本被国外公司高度垄断，他们具有成熟的水下采油树基地，满足各型号水下采油树及控制

表 3 代表性深水钻井旋转导向系统及其关键参数表

公司名称	型号	类型	关键参数
斯伦贝谢	PowerDrive Orbit	推靠式	造斜率 5°~8°/30 m, 测量井斜角 ±0.11°/方位角 ±1.8°, 耐温 150~165℃, 近钻头测量点 1.84~2.38 m
	PowerDrive Xceed	指向式	造斜率 6.5°~8°/30 m, 井斜角 ±0.2°/方位角 ±0.8°, 耐温 150℃, 近钻头测量点 3.90~5.09 m
	PowerDrive Archer	混合式	造斜率 15°~18°/30 m, 井斜角 ±0.11°/方位角 ±1.8°, 耐温 150℃, 近钻头测量点 2.29~2.75 m
贝克休斯	AutoTrak G3	推靠式	造斜率 6.5°~10°/30 m, 井斜角 ±0.15°, 耐温 150~175℃, 近钻头测量点 1.0~1.2 m
	AutoTrak eXact	推靠式	造斜率 10°~12°/30 m, 井斜角 ±0.15°, 耐温 150℃, 近钻头测量点 1.48~1.80 m
	AutoTrak GT4	推靠式	造斜率 8°~10°/30 m, 井斜角 ±0.15°, 耐温 150℃, 近钻头测量点 1.2 m
哈里伯顿	Geo-Pilot	指向式	造斜率 5°~10°/30 m, 井斜角 ±0.1°, 耐温 170℃, 近钻头测量点 1 m
	iCruise	指向式	造斜率 3°~15°/30 m, 井斜角 ±0.1°, 耐温 150℃, 近钻头测量点 1.72~1.81 m
中国海油	Welleader	推靠式	造斜率 6.5°~12°/30 m, 井斜角 ±0.1°, 耐温 150℃, 近钻头测量点 1.0~1.3 m
	W-Pivot	指向式	造斜率 8°~10°/30 m, 井斜角 ±0.1°, 耐温 150℃, 近钻头测量点 1.0 m

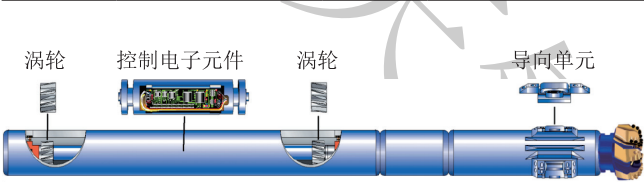


图 4 斯伦贝谢的 PowerDrive 系列旋转导向系统结构图

系统集成与测试需求,具有完整的技术体系^[32-33]。其采油树技术参数最大设计工作水深为 3 000 m,额定压力为 103 MPa。目前国外具备 3 000 m 级水下生产系统的安装技术与装备能力,由 Subsea 7、Technip 与 MacDemoctt 等公司提供工程安装服务,贝克休斯与 EnerMech 等公司提供调试及维护服务,具备完整的产业化能力^[34-35]。南海陵水 17-2 气田主要采用 Aker Solutions 公司开发的 69 MPa 卧式水下采油树,而陵水 25-1 气田则采用的是 Baker Hughes 公司开发

的 69 MPa 卧式水下采油树。

不同厂家的超深水水下采油树技术水平存在略微差别(表 4)。FMC Technologies 公司提供的深水立式采油树(EVDT)采用模块化设计,有效降低安装成本和停机时间,压力等级为 69~103 MPa,温度最高可达 176℃,适应 3 000 m 超深水环境。OneSubsea 公司产品种类丰富,包括卧式采油树、立式采油树(单通道和双通道)、全电驱动采油树等,其中混合采油树灵活性强,可批量安装,全电驱动技术在复杂作业环境中表现出色,但研发周期较长且成本较高。GE 公司则以深水卧式采油树(DHXT)为主,压力等级为 103 MPa,温度范围为-18~121℃,深水系统高集成度和轻量化设计提升了效率,但温度适应性相对较低。Aker Solutions 公司的产品支持大

表 4 代表性超深水水下采油树关键参数表

公司名称	产品种类	压力等级 / MPa	温度范围 / ℃	水深能力 / m	维修能力	技术优势
FMC Technologies	增强型深水立式采油树 (EVDT)	69~103	176	3 000	关键部件模块化,独立回收设计减少停机时间	EVDT 结合卧式和立式采油树优点,降低生命周期成本,模块化部件减少停机时间
OneSubsea	卧式采油树、立式采油树 (单通道与双通道)、全电驱动采油树、高压高温采油树、混合采油树	69~103	176	3 000	通用接口和模块化设计有效降低维护成本,混合采油树组件独立性强	种类丰富,全电驱动技术实现实时反馈,混合采油树灵活高效
GE	深水卧式采油树 (DHXT)	103	-18~121	3 000	控制模块独立回收,缩短维护周期	深水系统高集成度
Aker Solutions	卧式采油树 (深水、大孔径)、立式采油树、高压高温采油树	103	-20~176	3 000	双段对齐设计提高采油树组件更换效率,适应多种井口系统	支持多种井口系统,大孔径和高压高温设计成熟,防泄漏性能良好

孔径和高压高温环境，压力等级为 103 MPa，温度范围为 $-20 \sim 176\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。大孔径设计增强了适应性，但模块化程度稍逊，安装流程较为复杂。

近年来，中国多家公司（如江钻机械、上海霞为等）积极开展水下装备的技术攻关和相关研究，为中国超深水设备的国产化提供了有力的技术支持^[36-38]。

井口 SXW-15 是中国自主研发的首套适用于 3 000 m 水深、103 MPa 压力等级的水下井口系统，其性能已达到国际同类产品的水平（表 5）。与进口井口 SS15-RLD 相比，国产井口 SXW-15 在抗弯能力方面提高了 35.74%，载荷能力提升了 71.63%，同时成本降低了 45%，采购周期缩短了 60%。

表 5 国产与进口井口性能参数对比表

井口类型	适用水深 /m	工作压力 /MPa	抗弯能力 /(kN · m)	载荷能力 /t	可悬挂套管层次
国产井口 SXW-15	3 000	103	10 570	5 445	4
进口井口 SS15-RLD	3 000	103	7 800	3 175	3

2.5 水下应急装备

水下防喷器（Subsea Blowout Preventer, BOP）作为深水钻井作业中至关重要的井控设备（图 5），主要用于封堵井口、控制井内压力，防止井喷事故的发生^[39]。国外主流厂商如 Cameron、NOV、Hydril 等公司主导了 BOP 技术和装备市场，其中，Cameron 公司在 2015 年推出了全球首个三箱水下防喷器控制系统（3-POD），技术处于全球领先水平。国际上 BOP 已覆盖 $7\text{--}1/16\text{''} \sim 30\text{''}$ （ $1\text{''}=25.4\text{ mm}$ ）的尺寸范围，压力等级已突破 138 MPa，工作水深可达 3 000 m 以上^[40]。BOP 控制系统的发展也经历了多个阶段，从最初的液压直驱式控制到分离式液压系统，再到近年来的电液复合控制系统。当前，MUX 复合控制系统已经在超水深作业中广泛应用，具备更丰富的功能、更高的冗余性以及更快的响应速度。随着电驱执行机构的应用，国外已经研发了全电动防喷器，解决了低温结冰和深水蓄能器庞大的问题。



图 5 NOV 20 K 水下防喷器系统照片

国内方面，水下防喷器技术起步较晚。华北荣盛公司在 2021 年研制了 69 MPa 水下闸板防喷器样

机。目前中国海油正在攻关一套 3 000 m 级 103 MPa 水下防喷器，预计 2027 年投入深水钻井工程应用。国内的防喷器控制系统在价格和定制设计方面具有优势，未来在技术创新和产业化方面有着广阔的发展空间^[41]。总体来看，随着技术的不断发展和国际合作的加强，水下防喷器及其控制系统的技术水平将在未来几年内进一步提升。

水下应急封井器（Subsea Emergency BOP）是集机械制造、液压控制、数据监测、信息传递和水下机器人干预等技术于一体的重大海洋井控装备，是海洋石油工业处理井喷的终极手段。目前，全球仅有约 20 台同类装置，能够自行研发制造该型装备的国家屈指可数^[42]。封井器结构形式会因为不同研发公司而不同，典型的封井器结构主要由井口连接器、闸阀、节流阀、剪切闸板、井口重入连接器、ROV 控制面板、框架等部分组成^[43]。

2021 年，中国成功研制了 3 000 m 级水下应急封井器，并在南海深水海域海试成功，填补了中国在深水油气应急装备领域的技术空白（图 6）^[44]。与美国 MWCS 和 HFRS 一样，中国海油研制的应急封井装置最大设计作业水深达 3 000 m，但在压力等级和分流能力方面存在差异（表 6）。美国 MWCS 和 HFRS 的压力等级均为 103 MPa，而中国的封井装置



图 6 中国首套 3 000 m 级超深水应急封井器照片

表 6 中国首套应急封井器与国外封井器的关键参数对比表

应急封井器 类别	设计水深 /m	压力等级 / MPa	分流能力 / (m ³ · d ⁻¹)
美国 MWCS	3 000	103	16 000
美国 HFRS	3 000	103	10 000
中国 CNOOC	3 000	105	16 000

压力等级略高，达到 105 MPa，有助于应对更高压井控条件。在分流能力方面，MWCS 和中国的应急封井装置均达到 16 000 m³/d，远高于 HFRS 的 10 000 m³/d，这表明 MWCS 和 CNOOC 在快速转移井口流体以减轻压力方面具有更大优势，更适合高产量井况的应急需求。

3 超深水油气钻完井关键装备发展展望

以“深海一号”超深水大气田开发工程为标志，中国在超深水油气自主开发领域取得了历史性突破，成为全球范围内第三个具备超深水油气资源自主开发能力的国家。这不仅展现了中国深海油气开发技术的长足进步，也为南海等海域丰富的油气资源开发提供了重要保障。然而，与全球领先国家相比，中国在关键装备的研发和应用上仍存在一定差距，亟需在技术创新、国产化能力、智能化发展和环保技术等方面进一步努力，突破核心瓶颈，实现全面自主化和高质量发展。

3.1 推进关键装备国产化，提升自主研发能力

在超深水油气钻完井领域，关键装备的国产化是提升自主研发能力、突破国际技术垄断的重要路径。目前，超深水钻井平台、水下采油树和井口等核心装备仍依赖进口，长期受制于国际供应链，不仅导致开发成本高，还限制了应急响应和自主创新能力。为破解这一瓶颈，需优先攻克复合系泊系统动力学响应、高压深水采油设备和高耐腐蚀材料等技术难题，尤其需要针对南海台风频发的特点，提升装备的抗风浪能力和动态稳定性。同时，加快装备产业链本地化进程，推动材料、零部件和整机设备的一体化生产，通过企业与科研院所协同创新，构建完整、高效的国产装备生产体系。此外，政策支持至关重要，需设立专项扶持政策和资金投入，推动装备从研发到实际应用的全流程发展，并在示范性项目中优先采用国产装备以优化设计、积累经验，为超深水油气资源的自主开发提供技术和经济保障。

3.2 推动装备智能化，构建智慧开发体系

在超深水油气钻完井领域，装备智能化是提升开发效率与安全性、应对复杂环境挑战的核心方向。超深水作业需要高精度性和实时响应能力，智能监控系统的构建是关键，通过传感器和物联网技术可以实时采集温度、压力、流量等数据，结合人工智能和大数据分析，实现设备状态的实时监测与故障预测，提前规避风险。自动化钻井与无人化作业技术的推广能够减少对人工操作的依赖，利用远程控制技术和自主研发的海底机器人，实现复杂任务的精准施工，如采油树安装和设备检测等，同时降低人员安全风险。智能优化决策技术进一步提升资源利用率，通过智能算法动态调整钻井路径、作业参数和压力参数，减少井漏和卡钻等风险，提高钻井效率。此外，深度融合工业互联网，打造智能化装备系统，可以实现从作业规划到实时调控及后期维护的全生命周期管理。智能化技术的全面应用将推动超深水油气钻完井从传统模式向智慧化转型，为实现高效、安全、可持续开发提供强有力的技术支撑。

3.3 创新研发新型装备，破解技术瓶颈

在超深水油气钻完井领域，创新研发新型装备是破解技术瓶颈、提升开发能力的关键。极端深海环境对现有装备性能提出了更高要求，必须通过研发高性能钻井和采油装备（如耐高压钻杆和抗腐蚀管材），提升装备在高温、高压、强腐蚀条件下的可靠性和使用寿命。同时，创新型结构设计是重点方向，通过结合数值模拟与实验研究，开发能够应对非线性瞬态载荷的复合系泊系统和超深水平平台，提高装备的抗风浪能力和动态稳定性。此外，开发集成化海底生产系统，实现油气分离、存储和运输一体化作业，例如在海底直接完成油、气和水的分离和输送，可有效降低作业复杂度，提高开发效率。为了增强国际竞争力，还需加强自主知识产权保护，打造具有全球竞争力的装备体系，推动国产装备进入国际市场，提升中国在超深水油气装备领域的话语权。通过这些创新举措，将为深水油气开发提供新技术解决方案，加速中国迈向超深水油气开发的高质量发展阶段。

3.4 强化环保技术研发，实现绿色可持续发展

在超深水油气钻完井领域，强化环保技术研发是实现绿色可持续发展的必由之路。深海开发过程中废弃物、碳排放及溢油风险对海洋生态环境构成潜在威胁，因此需从全生命周期入手贯穿环保技术应用。首先，推动废弃物资源化利用，研发高效废水与钻

井废渣处理技术,通过专用设备将钻井液和生产废水转化为可循环资源,减少污染排放。其次,探索利用风能、波浪能等清洁能源为海上平台提供动力,并开发节能型装备和工艺,降低碳排放和单位能耗。此外,构建高效溢油监测与应急响应体系,开发快速响应装备和自动化治理技术,确保溢油事故能在第一时间得到控制,最大限度减少环境影响。最后,搭建涵盖钻井、生产、运输全流程的环保监测网络,实现实时数据监控与动态环境影响评估,确保作业活动在可控范围内进行。通过以上措施,中国将实现超深水油气开发的绿色转型,为全球能源行业提供生态友好和可持续发展的范例。

值得指出的是,超深水油气钻完井关键技术攻关及装备国产化并非一蹴而就,需在长期且艰难的科研攻关与工程实践中不断突破。依托国家和企业的各项政策支持及重大科研投入,短期内有望实现超深水采油树、水下防喷器、隔水管系统、精细控压钻井装备、海上大功率发电装置等关键装备的国产化。这些装备的国产化将显著提升中国自主开发能力,并降低开发成本。然而,一些高新科技与大型装备,如更强作业能力的钻井船/平台、复合系泊系统、海底全自动智能油气分离系统、自动化钻井技术等,仍需较长时间的技术攻关和创新。通过持续的科研投入与技术突破,最终将实现装备的全面国产化,推动中国在超深水油气开发领域迈向更高水平。

4 结束语

超深水油气资源开发是中国能源安全和海洋经济发展的重要战略方向。近年来,以南海为核心的超深水油气开发取得了历史性突破,展现了中国在超深水钻完井领域的技术进步和实践能力。然而,复杂的海洋环境、高风险作业条件和装备技术的进口依赖,仍是制约全面自主开发的重要瓶颈。未来,中国需加快推进装备国产化,加强关键技术攻关和产业链本地化建设,摆脱对国外技术的依赖。同时,需要推动智能化发展,深度融合人工智能和工业互联网技术,提高作业效率与安全性;创新研发适应极端环境的新型装备,突破技术瓶颈;强化环保技术应用,实现绿色可持续开发目标。通过技术创新和装备升级,突破超深水油气开发的核心瓶颈,构建自主、高效、绿色的开发能力,为全球能源行业提供中国方案,巩固国家能源安全,推动海洋经济高质量发展。

参 考 文 献

- [1] 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 Dexin, ZHANG Houhe, LI Chunrong, et al. Global deep- and ultra-deep-water oil and gas exploration: Review and outlook[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(10): 1-12.
- [2] 徐长贵,吴克强,裴健翔,等. 超深水超浅层天然气富集机理与成藏模式:以琼东南盆地陵水 36-1 气田为例[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(1): 44-56.
XU Changgui, WU Keqiang, PEI Jianxiang, et al. Enrichment mechanisms and accumulation model of ultra-deep water and ultra-shallow gas: A case study of Lingshui 36-1 gas field in Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(1): 44-56.
- [3] 刘晓龙,王涛,张毅. 南海深水钻井技术发展与挑战[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 567-575.
LIU Xiaolong, WANG Tao, ZHANG Yi. Development and challenges of deepwater drilling technology in the South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 567-575.
- [4] 刘小兵,窦立荣. 国际大油公司深水油气勘探实践及启示——以圭亚那斯塔布鲁克区块为例[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(3): 78-89.
Liu Xiaobing, Dou Lirong. Practice and enlightenment of deepwater petroleum exploration of international major oil companies: A case study of Guyana Stabroek Block[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(3): 78-89.
- [5] 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 Zhixin, WANG Jianjun, WANG Zhaoming, et al. Analysis of the world deepwater oil and gas exploration situation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(5): 924-936.
- [6] 王震,王思允. 全球深水油气勘探开发进展与研究综述[J]. 天然气与石油, 2024, 42(6): 1-10.
WANG Zhen, WANG Siyun. Comprehensive review of advances and research in global deepwater exploration and development[J]. Natural Gas and Oil, 2024, 42(6): 1-10.
- [7] 吴莉. 我国在南海探获全球首个超深水超浅层千亿方大气田[N]. 中国能源报, 2024-08-12(12).
WU Li. China discovers the world's first ultra-shallow ultra-deepwater gas field in the South China Sea[N]. China Energy News, 2024-08-12(12).
- [8] 刘和兴,孟文波,刘书杰. “深海一号”超深水气田高效钻完井管理创新与实践[J]. 中国石油企业, 2024(3): 40-46.
LIU Hexing, MENG Wenbo, LIU Shujie. Innovation and practice of efficient drilling and completion management in the "Shenhai-1" ultra-deepwater gas field[J]. China Petroleum Enterprise, 2024(3): 40-46.
- [9] 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 Zhong. 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.
- [10] 李阳, 赵晶瑞, 谢彬, 等. “深水地平线” 沉没事故带来的海洋平台设计的思考 [J]. 海洋工程装备与技术, 2015, 2(6): 405-410.
- LI Yang, ZHAO Jingrui, XIE Bin, et al. Design considerations of ocean platform coming from the sinking accident of deepwater horizon semi-submersible drilling platform[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2015, 2(6): 405-410.
- [11] 李中, 殷志明, 田得强. 深远海超深水钻井井控风险防控技术研究进展 [J]. 钻采工艺, 2024, 47(4): 8-17.
- LI Zhong, YIN Zhiming, TIAN Deqiang. Research progress on well control risk management technology for deep sea and ultra-deep water drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(4): 8-17.
- [12] 李中, 方满宗, 李磊. 南海西部深水钻井井实践 [J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(1): 92-95.
- LI Zhong, FANG Manzong, LI Lei. Drilling practices of deepwater well in west of South China Sea[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(1): 92-95.
- [13] 刘正礼, 严德. 南海东部荔湾 22-1-1 超深水井钻井关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(1): 13-19.
- LIU Zhengli, YAN De. Key drilling techniques of Liwan 22-1-1 ultra-deepwater well in east of South China Sea[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(1): 13-19.
- [14] 黄熠, 刘书杰, 周建良, 等. 陵水 17-2 气田深水钻完井关键技术研究与应用 [J]. 中国海上油气, 2021, 33(5): 130-135.
- HUANG Yi, LIU Shujie, ZHOU Jianliang, et al. Research and application of key technologies for deep water drilling and completion in LS17-2 Gas Field[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(5): 130-135.
- [15] 刘书杰, 吴艳辉, 赵鹏. 深水平台控压钻井技术浅析 [J]. 钻采工艺, 2023, 46(4): 1-6.
- LIU Shujie, WU Yanhui, ZHAO Peng. Analysis of BTR managed pressure drilling in deepwater platform[J]. Drilling & Production Technology, 2023, 46(4): 1-6.
- [16] 李晓刚, 苗典远, 刘宝生, 等. 海洋精细控压钻井技术现状及应用 [J]. 钻采工艺, 2024, 47(4): 105-112.
- LI Xiaogang, MIAO Dianyuan, LIU Baosheng, et al. Current status and application of offshore managed pressure drilling technology[J]. Drilling and Production Technology, 2024, 47(4): 105-112.
- [17] 廖谟圣. 海洋石油钻采工程技术与装备 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2010.
- LIAO Mosheng. Offshore oil drilling and production engineering technology and equipment[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2010.
- [18] 曹式敬. 超深水防喷器组及其控制系统配置探讨 [J]. 石油钻探技术, 2012, 40(5): 115-118.
- CAO Shijing. Discussion on configuration of subsea BOP stack and its control system in ultra-deep water[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(5): 115-118.
- [19] 李清平, 孙钦, 程兵, 等. 陵水 17-2 气田深水水下生产系统工程设计关键技术 [J]. 中国海上油气, 2021, 33(3): 180-188.
- LI Qingping, SUN Qin, CHENG Bing, et al. Key technologies for engineering design of deepwater subsea production system in LS17-2 Gas Field[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(3): 180-188.
- [20] 王懿. 水下生产系统及工程 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2017.
- WANG Yi. Subsea production systems and engineering[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2017.
- [21] 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.
- [22] 王懿, 段梦兰, 焦晓楠. 深水油气开发装备发展现状及展望 [J]. 石油机械, 2013, 41(10): 51-55.
- WANG Yi, DUAN Menglan, JIAO Xiaonan. Current situation and prospect of deepwater petroleum development equipment[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(10): 51-55.
- [23] 王定亚, 孙娟, 张茹新, 等. 海洋钻井装备技术现状与发展思路研究 [J]. 石油机械, 2021, 49(3): 84-89.
- WANG Dingya, SUN Juan, ZHANG Jiaxin, et al. Technology status and development thinking of offshore drilling equipment[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(3): 84-89.
- [24] 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 Zhong. Progress and prospect of deepwater drilling technology in CNOOC[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(3): 114-120.
- [25] 刘书杰, 任美鹏, 李军, 等. 我国海洋控压钻井技术适应性分析 [J]. 中国海上油气, 2020, 32(5): 129-136.
- LIU Shujie, REN Meipeng, LI Jun, et al. Adaptability analysis of offshore managed pressure drilling technologies in China[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(5): 129-136.
- [26] 王金铎, 王宴滨, 高德利, 等. 基于系统弱点与平台漂移分析的深水钻井隔水管作业窗口分析方法——以陵水 17-2 气田为例 [J]. 天然气工业, 2024, 44(12): 128-136.
- WANG Jinduo, WANG Yanbin, GAO Deli, et al. Working window analysis method of deepwater drilling riser based on system weakness and platform drift analysis: A case study on LS17-2 gas field[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(12): 128-136.
- [27] 康建伟. 海洋平台钻杆的升沉补偿装置原理与装备研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2015.
- KANG Jianwei. Principle and research of heave compensation system for drill string on platform[D]. Xi'an: Xi'an Petroleum University, 2015.
- [28] 黎伟, 牟磊, 周贤成, 等. 旋转导向系统及其控制方法研究进展 [J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(10): 167-179.
- LI Wei, MOU Lei, ZHOU Xiancheng, et al. Research progress of rotary steerable system and its control methods[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(10): 167-179.
- [29] 苏义脑, 窦修荣, 高文凯, 等. 旋转导向系统研究现状与发展趋势 [J]. 钻采工艺, 2024, 47(3): 1-8.
- SU Yinao, DOU Xiurong, GAO Wenkai, et al. Research status

- and development trends of rotary steerable system[J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(3): 1-8.
- [30] 中国石油勘探与生产公司斯伦贝谢中国公司. 地质导向与旋转导向技术应用及发展 [M]. 2 版. 北京: 石油工业出版社, 2021. PetroChina E&P Company, Schlumberger in China. Application and development of geosteering and rotary steerable system technologies[M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021.
- [31] 付天明. Geo-Pilot 旋转导向系统发展与应用研究 [J]. 石油矿场机械, 2014, 43(5): 77-80.
- FU Tianming. Study of development and application of Geo-Pilot rotary steering drilling system[J]. Oil Field Equipment, 2014, 43(5): 77-80.
- [32] 李志刚, 安维峥. 我国水下油气生产系统装备工程技术进展与展望 [J]. 中国海上油气, 2020, 32(2): 134-141.
- LI Zhigang, AN Weizheng. Progress and outlook of equipment engineering technologies for subsea oil and gas production system in China[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(2): 134-141.
- [33] 万春燕, 王定亚, 刘文霄, 等. 水下采油树系统配套工具技术研究和发展建议 [J]. 石油机械, 2020, 48(7): 74-79.
- WAN Chunyan, WANG Dingya, LIU Wenxiao, et al. Research and development suggestion of supporting tools for underwater Christmas tree system[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(7): 74-79.
- [34] 王宇, 张俊斌, 陈斌, 等. 水下采油树应用技术发展现状 [J]. 石油机械, 2016, 44(12): 59-64.
- WANG Yu, ZHANG Junbin, CHEN Bin, et al. Development status of subsea Christmas tree[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(12): 59-64.
- [35] 于成龙, 李慧敏. 水下采油树在深海油气田开发中的应用 [J]. 天然气与石油, 2014, 32(2): 53-56.
- YU Chenglong, LI Huimin. Application of undersea Christmas tree in domestic deep sea oil and gas field development[J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32(2): 53-56.
- [36] 王定亚, 刘小卫, 金弢, 等. 海洋水下井口装置技术分析及发展建议 [J]. 石油机械, 2011, 39(10): 170-173.
- WANG Dingya, LIU Xiaowei, JIN Tao, et al. Technical analysis and development suggestions for marine subsea wellhead devices[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(10): 170-173.
- [37] 李健, 关清涛. 深水水下井口研究现状及发展建议 [J]. 石化技术, 2023, 30(6): 149-151.
- LI Jian, GUAN Qingtao. Research status and development suggestions of deep-water subsea wellhead[J]. Petrochemical Industry Technology, 2023, 30(6): 149-151.
- [38] 王金龙, 许亮斌. 深水水下井口系统疲劳监测损伤评估研究进展 [J]. 石油机械, 2023, 51(1): 53-60.
- WANG Jinlong, XU Liangbin. Research progress of fatigue monitoring and damage assessment of deepwater subsea wellhead[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(1): 53-60.
- [39] AIRD P. Chapter 14-Deepwater subsea bop and marine drilling riser[M]//AIRD P. Deepwater Drilling. Cambridge: Gulf Professional Publishing, 2019: 507-562.
- [40] 王蓉, 王定亚, 郝和飏, 等. 海洋超高温高压油气钻井关键设备技术研究 [J]. 石油机械, 2024, 52(1): 76-81.
- WANG Rong, WANG Dingya, HAO Heya, et al. Technical research on key equipment for offshore ultra-high temperature and high-pressure oil and gas well drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52(1): 76-81.
- [41] 赵涛, 黄元元, 贾向锋, 等. 我国海洋油气钻井装备技术现状及展望 [J]. 石油机械, 2022, 50(4): 56-62.
- ZHAO Tao, HUANG Yuanyuan, JIA Xiangfeng, et al. Offshore oil/gas drilling equipment in china: Review and prospect[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(4): 56-62.
- [42] 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 Dianyuan, LI Xuexiong, YANG Xinyu, et al. Overview of current subsea capping stack and its development[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2019, 6(S1): 181-185.
- [43] 张钦岳, 殷志明, 李滨. 海洋深远海油气开发应急救援装备发展趋势 [J]. 石化技术, 2021, 28(3): 137-141.
- ZHANG Qinyue, YIN Zhiming, LI Bin. Development trends of emergency rescue equipment for offshore deep-sea oil and gas development[J]. Petrochemical Industry Technology, 2021, 28(3): 137-141.
- [44] 瞿剑. 国产首套水下封井器海试成功可应对 3000 米水下漏油事故 [N]. 科技日报, 2021-08-18(5).
- QU Jian. China's first domestically developed subsea blowout preventer successfully passes sea trials, capable of handling oil spills at 3000 meters underwater[N]. Science and Technology Daily, 2021-08-18(5).

(修改回稿日期 2025-04-03 编辑 王 斌)



本文互动