

doi:10.11911/syztjs.2025051

引用格式: 范白涛. 中国海油深水及海上深层钻完井技术进展与展望 [J]. 石油钻探技术, 2025, 53(3): 11-19.

FAN Baitao. Progress and prospects of deepwater and offshore deep formation drilling and completion technologies of CNOOC [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2025, 53(3): 11-19.

# 中国海油深水及海上深层钻完井技术进展与展望

范白涛

(中海石油(中国)有限公司, 北京 100020)

**摘 要:** 深水及海上深层油气资源是我国海洋油气增储上产的关键,但其钻完井作业面临复杂工程地质条件、极端环境与高成本等多重挑战。系统综述了中国海油在深水及海上深层钻完井领域的关键技术进展,展望了未来发展方向,旨在为复杂场景下的安全高效开发提供理论支撑与实践参考。针对深水复杂井井控溢流监测、井筒完整性、高效完井等核心难题,中国海油创新研发了气侵早期海底预警技术、全寿命环空压力调控技术及多流道旁通筛管等装备,成功保障了“深海一号”超深水大气田等重大项目的安全投产;针对海上深部地层复杂、开发成本高等瓶颈问题,中国海油提出了多源信息融合构造识别、抗高温低成本防腐及硬地层裸眼侧钻等关键技术,显著提升了渤中 19-6 等深层气田的开发效率。然而,深水超浅气层开发、深水深层高温高压工况叠加等复杂场景仍存在技术瓶颈,核心工具、装备及工程设计软件的自主化程度有待进一步提高。未来,中国海油需重点突破超深层钻井智能控制、全生命周期防腐优化及颠覆性绿色技术研发,以增强自主可控能力,推动我国深水及海上深层油气资源的高效开发。

**关键词:** 深水; 海上深层; 钻井; 完井; 技术进展; 中国海油

**中图分类号:** TE52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2025)03-0011-09

## Progress and Prospects of Deepwater and Offshore Deep Formation Drilling and Completion Technologies of CNOOC

FAN Baitao

(CNOOC China Limited, Beijing, 100020, China)

**Abstract:** Deepwater and offshore deep formation oil and gas resources are crucial for enhancing reserves and production in China's offshore oil and gas industry. However, there are multiple challenges for the drilling and completion operations such as complex engineering and geological conditions, extreme environments, high costs, etc. This paper systematically reviews the key technological advancements made by China National Offshore Oil Corporation (CNOOC) in the fields of deepwater and offshore deep formation drilling and completion, and outlines the future development directions. It aims to provide theoretical support and practical references for safe and efficient development under complex scenarios. To address core challenges such as well control overflow monitoring, wellbore integrity, and efficient completion in deepwater complex wells, CNOOC has innovatively developed seabed gas invasion early warning systems, full lifecycle annular pressure management technology, and multi-channel bypass screen equipment, etc. These innovations have successfully ensured the successful commissioning of major projects such as the “Deep Sea No.1” ultra-deepwater gas field. To address the bottlenecks of complex offshore deep formations and high development costs, CNOOC has proposed key technologies such as multi-source information fusion for structural identification, high-temperature-resistant and low-cost corrosion prevention, and open-hole

收稿日期: 2025-05-26。

作者简介: 范白涛 (1975—), 男, 河南邓州人, 1998 年毕业于大庆石油学院石油工程专业, 2018 年获中国石油大学(北京)油气井工程专业博士学位, 正高级工程师, 主要从事海上钻完井技术研究与管理工作。E-mail: fanbt@cnooc.com.cn。

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目“融合岩石物理-钻井信息的海上深层钻井风险识别方法研究”(编号: U24B2031)、中国海洋石油集团有限公司“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)及“海上低渗及潜山油气田复杂结构井技术”(编号: KJGG2022-0703)资助。

sidetracking in hard formations. These technologies significantly have improved development efficiency in deep gas fields such as BZ19-6. However, technical bottlenecks still exist in complex scenarios such as ultra-shallow gas zone development in deepwater areas and superposition of high temperature and high pressure working conditions in deepwater, while the localization level of critical tools, equipment, and engineering design software requires further enhancement. Future efforts should focus on breakthroughs in intelligent control of ultra-deep drilling, full lifecycle corrosion prevention optimization, and disruptive green technology research and development, so as to strengthen independent control capabilities and promote efficient exploitation of China's deepwater and offshore deep formation oil and gas resources.

**Key words:** deepwater; offshore deep formation; drilling; completion; technological progress; CNOOC

深水、海洋深层已成为全球油气勘探开发的重要领域,也是我国海洋油气增储上产的重要方向。一方面,我国南海蕴藏约  $37 \times 10^{12} \text{ m}^3$  的天然气资源,约 70% 位于深水和超深水海域;另一方面,我国海上埋深 3 500~4 500 m 的深层以及埋深超 4 500 m 的超深层呈现巨大的资源潜力,已探明石油储量近  $10 \times 10^8 \text{ t}$ 、天然气近  $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。因此,加快深水及海洋深层油气资源勘探开发对于提升我国油气资源保障能力和建设海洋强国具有重大战略意义<sup>[1]</sup>。

“十四五”以来,中国海油持续加大深水及海上深层油气勘探开发力度,攻关深水及海洋深层复杂井安全高效钻完井技术,支撑油气勘探开发取得重大进展。深水方面,“深海一号”超深水大气田(陵水 17-2 气田)、“深海一号”二期工程(陵水 25-1 气田)相继于 2021 年 6 月和 2024 年 9 月建成投产,宝岛 21-1 深水深层气田、陵水 36-1 深水超浅层气田获得重大勘探发现<sup>[2]</sup>;海洋深层方面,渤中 19-6 深层气田 I 期顺利投产,渤中 26-6 和惠州 26-6 等海洋深层油田进入开发阶段,钻完井作业顺利实施<sup>[3]</sup>。然而,随着勘探开发向更深水域、更深地层推进,深水及海上深层钻完井作业面临更大的技术挑战。深水区域的高温高压、超浅气层,以及海上深层的极硬地层、低渗储层等,对现有技术提出了更高的要求。此外,关键核心工具装备及工程设计软件的自主化程度不足,也制约了我国深水及海上深层油气开发的进一步发展。

面向未来,中国海油将继续加强超高温高压、超深层钻井、智能钻完井等关键技术的研发,推动关键核心工具装备的国产化进程,提升我国深水及海上深层钻完井技术的自主可控能力,为我国海洋油气资源高效开发提供坚实的技术保障。为此,笔者综述了中国海油在深水及海上深层钻完井领域关键技术的进展,展望了未来发展方向,以期为复杂场景下的安全高效开发提供理论支撑与实践参考。

## 1 技术挑战及发展概况

### 1.1 深水钻完井技术

南海位于印澳-欧亚-太平洋三大板块交界处,深水钻完井面临的共性挑战主要有:工程地质条件复杂,储层温度高、压力窗口窄,海洋环境条件恶劣,台风频发,内波流、洋流活跃等。不同油气区块更面临不同的技术挑战,以“深海一号”超深水大气田为例,钻完井面临区块分散、单井产能需求高、井况恶劣等,易造成井喷、井筒出砂等复杂情况,且超深水钻完井作业周期长、成本高<sup>[4-6]</sup>;“深海一号”二期工程钻完井面临深水及高温高压叠加工况、大位移水平井、井筒完整性等风险<sup>[7]</sup>;白云洼陷深水区块面临极高温、储层低渗等难题;永乐深水区块面临潜山古老地层易漏失、地层可钻性差等难题;宝岛深水区块具有储层低渗等特点。中国海油海外深水区块涉及西非、巴西、圭亚那、墨西哥湾、加蓬等国家及地区,普遍面临巨厚盐层及复杂温压体系等挑战。

针对以上技术挑战,中国海油通过布局重大技术攻关项目研究和工程实践,在深水钻完井总体方案设计体系、环境风险与地质灾害评估及控制、深水安全高效钻井、高效完井及模块化测试、井控及应急救援、关键工具装备国产化等 6 个方面取得了显著进展,初步形成了具有海油特色的安全高效深水钻完井关键技术。尤其是“十四五”以来,重点在深水复杂井设计作业及装备国产化方面取得了不少新成果。

随着深水钻完井技术的不断进步,中国海油在深水领域的业务遍布全球典型深水区块,深水钻完井已常态化迈入水深超 1 500 m 的超深水行列,取得了显著进步。自 2012 年我国自主建造的 3 000 m 级深水半潜式钻井平台(海洋石油 981,也称“奋进号”)投用至今,中国海油已在南中国海自主作业

深水及超深水井 150 余口(以水深大于 500 m 为界),支撑发现了 7 个大中型深水油气田,勘探钻井最大水深纪录 2 619 m,已开发气田最大水深纪录 1 564 m,最高地层压力系数 2.08、井底温度 176 ℃,最浅储层埋深仅在泥线以下 200 m 左右,即全球首个深水超浅气田陵水 36-1 气田<sup>[8]</sup>。

## 1.2 海上深层钻完井技术

虽然海上深层油气资源的绝对埋藏深度不及陆地,但是受沉积年代和沉积环境的影响,海上深层钻井又面临其特有的技术难点,主要包括:

1)受火山喷发及复杂变质历史、复杂构造运动、独特流体充注等因素耦合作用,海上深层钻井特殊地质风险构造识别精度低,非预见性钻遇易漏层导致的井下严重故障多。

2)复杂的沉积环境叠加复杂岩性,导致中间过路层钻井过程中井壁失稳问题突出,钻进中垮塌、阻卡严重<sup>[9]</sup>。

3)海洋深层温度梯度高,储层绝对温度普遍在 150 ℃ 以上,最高可达 200 ℃,在严苛的温压环境下,CO<sub>2</sub> 与 H<sub>2</sub>S 共存对井筒的长效防腐提出了更高要求<sup>[10]</sup>。

4)深埋潜山储层的抗压强度高达 241 MPa,叠加高温环境,钻头寿命与机械钻速面临严峻挑战。如渤中 19-6 气田初期钻井,单只钻头仅能取得 40~50 m 进尺,机械钻速仅在 1 m/h 左右,这对海上高日费作业环境来说是难以接受的。

5)深埋储层往往伴随低渗透特征。如何在低渗透、高应力、高温环境下降低对储层的伤害、释放产能,也是海上深层油气钻井面临的难题。

中国海油针对上述技术难点对工程影响的本质,从机理出发,通过多学科交叉融合,利用机器学习等多种分析方法,在钻井工程地质风险分析、全过程低成本防腐、深层硬岩提速提效以及低渗储层产能释放等方面取得了阶段性认识与成果,为近年来海上深层油气田的发现和高效开发提供了技术基础。如以中浅层为主的渤海海域,2020—2022 年连续 3 年成功发现渤中 19-6、渤中 13-2 和渤中 26-6 等 3 个深层亿吨级油气田,助力渤海油田成为全国第一大原油生产基地。

## 2 深水复杂井钻完井关键技术进展

### 2.1 深水气侵早期监测预警技术

井喷是钻井过程中最严重的井下故障,而气侵

溢流是井喷的先兆,如能尽早监测到气侵溢流信号,对预防井喷尤为重要。深水钻井隔水管段由于环空体积大,钻井流体返速小,如发生气侵溢流,气侵流体从井底到泥线再到隔水管段直至到地面钻井液池需要较长时间,采用监测钻井液池中钻井液体积增量的方法进行井控预警及处置的风险大幅增加,对井控装备和操作的可靠性要求极高。利用水中的隔水管段实现气侵信号的提前监测成为深水井控溢流研究的前沿<sup>[11]</sup>。

基于超声波多普勒频移原理(即当发射的超声波在传播过程中遇到固体颗粒或气泡时,会在它们的表面形成反射,使反射到接收器上的超声波频率与发射频率之间存在差异,该频率差就是由于流体中固体颗粒或气泡运动而引起的多普勒频移),研究了深水气侵早期监测预警技术,并研制出安装在底部隔水管外壁上的海底气侵早期监测装置,利用无线传输方式,气侵信号可直接从海底无线高速传输至平台上。

该气侵早期监测装置主要包括水面单元和水下单元 2 部分。水面单元由监控主机(包含分析软件)、水声接收模块组成,监控主机布设在录井监控室,水声模块通过支撑杆安装在水面下 30~50 m 水深的隔水管外侧;水声模块通过电缆与监控主机相连,实现水声信号的收发和编解码。水下单元由气侵监测模块、水声通讯模块、电池组模块、传感器抱箍、换能器支架、电缆等组成,水下单元通过卡箍安装在隔水管外壁。深水气侵早期监测预警技术原理如图 1 所示。

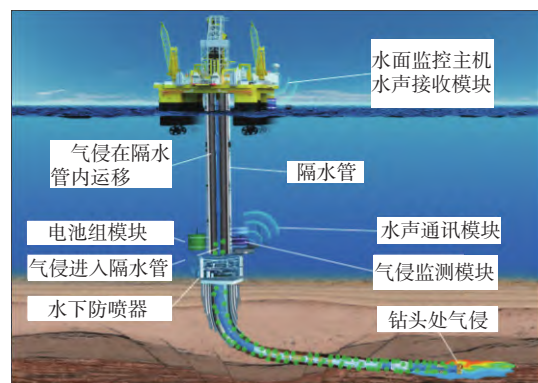


图 1 深水气侵早期监测预警技术原理示意

Fig.1 Principle of early monitoring and early warning technology for deepwater gas invasion

与测量钻井液池中钻井液体积增量的方法相比,深水气侵早期监测预警技术在 1 500 m 水深工况下,井控预警时间可提前 10 min,实现了井控风险

早发现、早处置,可有效保障超深水高产气井钻井安全。

### 2.2 深水开发井全寿命井筒完整性技术

深水水下井口油气井,由于生产过程中的温度效应,会导致密闭环空液体膨胀而空间受限,致使压力升高,一旦超过极限值会影响井筒完整性和安全。因此,环空压力的精确预测和调控是深水开发井全寿命井筒完整性保障的核心。但深水井由于水下井口的特殊性,除了油管与生产套管环空(A环

空)可监测放压外,其他环空无法处理,只能依靠精准预测制定预防性措施<sup>[12-13]</sup>。

传统模型在预测温度效应所致的环空压力时,对于环空体积的变化仅考虑了自由段套管的变形。中国海油开展了固井段及其与套管间协调变形研究,得到了考虑固井段变形影响的深水井环空压力预测方法,建立了相应模型(本文模型),使计算所得体积与实际变化的体积更接近。本文模型与传统模型预测结果的对比情况见表1。

表1 本文模型与传统模型深水环空压力预测结果对比

Table 1 Comparison of deepwater annulus pressure prediction results by proposed model and traditional model

序号	实测温度/°C	实测压力/MPa	传统模型预测值及精度			本文模型预测值及精度		
			预测值/MPa	预测误差, %	预测精度, %	预测值/MPa	预测误差, %	预测精度, %
1	40.1	18.0	21.2	18	82	19.1	6	94
2	30.3	10.5	12.5	19	81	11.0	5	95
3	50.7	21.5	26.0	21	79	22.8	6	94

由表1可知,对于典型的3组数据,传统模型预测精度为79%~82%,而本文模型为94%~95%。

基于环空压力的精确预测,通过对A环空压力的准确监测和调控,以实现A环空和B环空(生产套管与技术套管环空)的压力平衡(见图2),确保了水下井口井筒长效安全,此技术也为深水探井转开发井提供了可靠保障,应用于“深海一号”超深水大气田2口探井转开发井,在最高日产 $230 \times 10^4 \text{ m}^3$ 气井已安全平稳生产超过42个月。

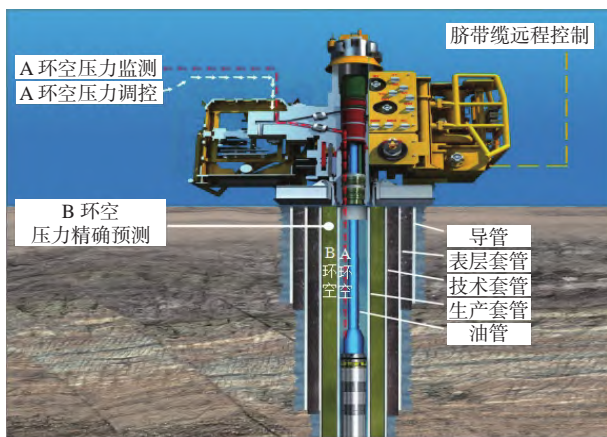


图2 深水开发井环空压力精确调控示意

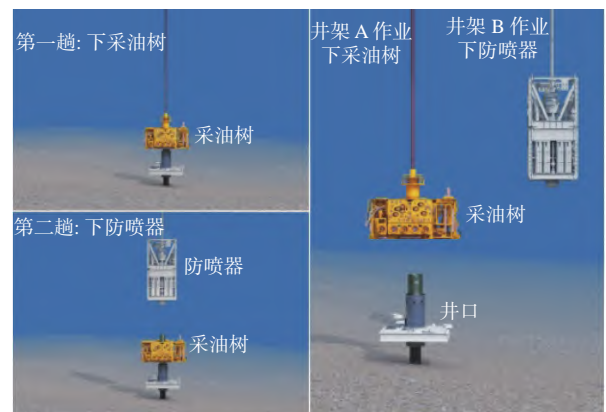
Fig.2 Precise adjustment and control of annulus pressure in deepwater development wells

### 2.3 深水防喷器与采油树双线并行作业技术

深水钻完井作业综合日费高,提高作业时效是降低成本的关键。一般而言,在深水完井期间,安

装质量50~60t的水下采油树和200t的水下防喷器时采用接续下入方式,即使是双井架钻井平台也是如此。但由于下入水下防喷器、水下采油树速度慢(如1500m水深分别需要2.5d和1.5d),考虑采油树调试等工序,共需要4~5d时间。

为充分发挥双井架深水钻井平台的优势,建立了考虑波浪、海流等复杂海况影响的窄间距、超长柔性双线管柱作业参数优化方法,研发了管柱应力变形参数监测装置,解决了水下防喷器与水下采油树同时下入过程中可能的碰撞问题,实现了深水水下采油树与水下防喷器由串联接续下入到并联同时下入的突破(见图3),作业时效提高近2倍,在“深



传统模式: 串联接续下入

创新模式: 并联同时下入

图3 深水水下采油树与水下防喷器作业模式对比

Fig.3 Comparison of operation modes between deepwater blowout preventer and Christmas tree

海一号”一期和二期工程全面成功应用<sup>[9-11]</sup>。

## 2.4 深水高效防砂及上下部一体化完井技术

### 2.4.1 多流道旁通筛管

有效防砂对油气井长效安全生产意义重大,尤其是在深水油气田开发中,一旦防砂失效,高速流体混合地层砂会对油管及海底管道等设施造成冲蚀破坏,需要关停、修井或修复管道等。“深海一号”一期和二期工程中,气田储层均存在出砂风险,理论研究表明,均需采用砾石充填方式进行防砂。

对于常规普通筛管,开展深水长水平井段砾石充填防砂时,由于局部井眼不规则、泥岩段黏土膨胀等原因,极易发生砂堵,使部分井段不能充满砾石,不能形成均匀稳定的砾石充填层,可能影响防砂效果,甚至导致防砂失败(见图 4(a))<sup>[12]</sup>。为了提高深水油气井防砂的有效性,中国海油研发了“径向多点、轴向贯通”多流道旁通筛管(见图 4(b)),在传统筛管的基管和网布之间,周向上均匀布设一定数量的旁通管,并沿轴向间隔一定距离设计径向充填孔,以大幅度增大充填过流面积。由于径向充填孔可有效解决局部砂堵问题,在砾石充填过程中发生漏失桥堵情况时,通过旁通管绕过堵塞点,继续完成充填,可提高充填效率。

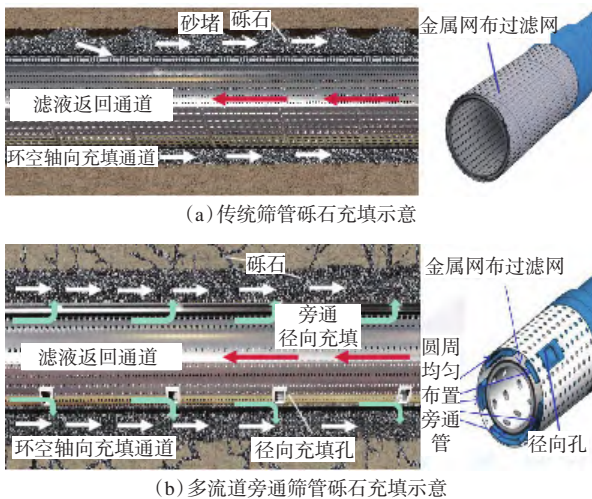


图 4 多流道旁通筛管与传统筛管砾石充填效果对比  
Fig.4 Comparison of gravel packing performance between multi-channel bypass screen and traditional screen

多流道旁通筛管在“深海一号”超深水大气田及“深海一号”二期工程中全面应用,防砂作业成功率 100%,砾石充填效率平均达到 130%,有效保障了深水疏松砂岩储层高产气井安全生产。

### 2.4.2 深水上下部一体化高效完井技术

深水完井一般分为下部完井和上部完井,下部

完井的主要工作内容为储层段的防砂作业,上部完井的主要工作内容为生产管柱的下入及清喷投产测试。上下部完井期间各种设备设施数量多、占地面积大、流程复杂。对于深水开发井,国际上的传统做法是先进行批量下部完井,再进行批量上部完井,以解决平台甲板空间不足的问题。但该模式下,由于下部完井后临时弃井期间留置在储层中的完井液会对储层造成长时间浸泡,可能导致储层污染而影响产能<sup>[14]</sup>。

通过对深水上下部完井所涉及的设施设备进行功能共享、空间布置优化、连接流程优化等研究,使设备设施吊装次数减少 25%,安装时间缩短 50%,占地面积减小 30%,实现了上下部完井设施设备模块化和撬装化集成(见图 5)与一体化高效完井作业,大幅缩短了储层浸泡时间,储层表皮系数由行业内的平均 10~15 减至 0,清喷产量达到配产的 1.3 倍。

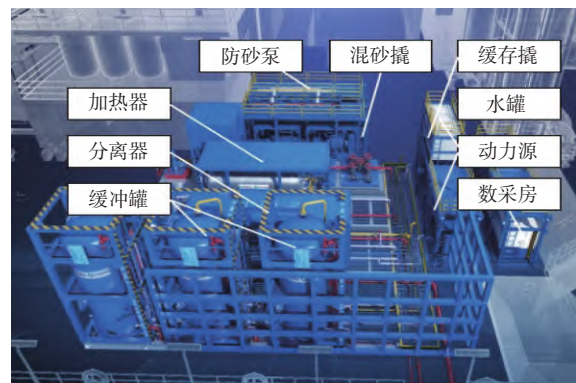


图 5 深水上下部一体化完井测试撬装化设备  
Fig.5 Skid-mounted equipment for deepwater upper and lower integrated completion testing

## 2.5 深水钻完井核心装备研发进展

深水钻完井核心装备包括作业平台、关键钻井装备、水下采油树等,是保障安全作业的关键。中国海油曾长期依赖国外服务公司,存在自主性低、采购周期长、费用高昂等问题。“十四五”以来,中国海油进一步加大深水钻完井核心装备研发,取得了长足进步。

深水作业平台方面,中国海油已经拥有以“奋进号”、“兴旺号”、HYSY982、NH9、NH8 等半潜式平台为主的深水作业装备,并且还有“蓝鲸一号”、“蓝鲸二号”等超深水钻井装备,可高效保障我国深水钻完井作业需求。

关键钻井装备方面,已开展深水防喷器组及控制系统、防喷器运移系统、动力定位控制系统、钻柱补偿器系统、钻井隔水管系统及隔水管张紧器系统

等成套化装备的研制,目前各项研究有序推进,其中部分规格的深水隔水管已经完成出厂测试,获得CCS船级社产品认证<sup>[13]</sup>。

深水水下采油树方面,开展了工作压力69 MPa、1 500 m水深级深水气井水下采气树的研发,整体完成详细方案设计,大部分零部件的加工制造结束,处于总装、集成、测试阶段,计划于2025年开展海洋环境功能性和安装性测试<sup>[14]</sup>。

### 3 海上深层钻完井关键技术进展

#### 3.1 多源信息融合复杂构造识别技术

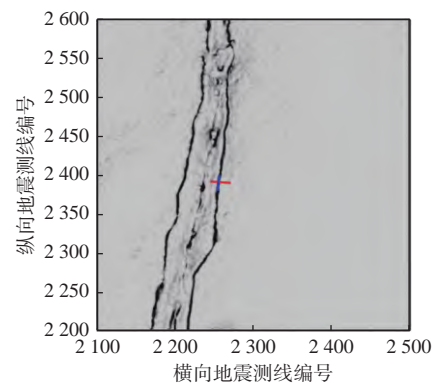
##### 3.1.1 井震信息融合分辨率识别技术

研究表明,基于地震数据校正钻井、测井以及录井数据,能够有效提前预判钻头前方易引起工程问题的地层<sup>[15]</sup>。地震数据的分辨率越高,对地质构造的识别精度就越高。通过设计不同断距的正演模型,利用不同主频的地震子波开展了多尺度断裂模型正演,正演结果表明,地震资料主频越高,小尺度断裂的可分辨性越强。因此,通过子波驱动的频率拓展方法,建立了地震数据高分辨处理方法。该方法将统计得到的实际地震子波数据结合,合成地震数据,形成高分辨率训练数据集,基于训练后的模型即可针对实际工区地震数据进行拓频应用,提高中小尺度构造的分辨率,使之逼近7 m。

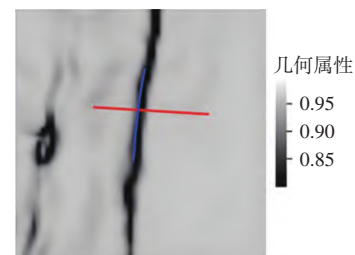
##### 3.1.2 钻井多尺度风险断裂高精度识别

中深部地层的断裂往往规模较小、反射信号微弱,利用常规地震数据刻画断裂空间位置的效果不理想,有时甚至在地震剖面上没有显示,这给风险断裂体系的识别带来了巨大挑战<sup>[16]</sup>。在对地震数据进行高分辨率处理的基础上,利用断裂在井筒不同方向的信息差异,用地震资料的方位和频率信息等构建反映断裂走向、倾向等特征的计算方法,建立了钻井多尺度风险断裂识别方法。该方法的基本原理如图6所示:以井周沿层位切片的走滑断裂(见图6(a))为例,沿着近似垂直于构造走向方向(红线表示)的波形变化在断裂处较强,表现出明显的同相轴错断现象,而沿着近似平行于断裂构造走向方向(蓝线表示)的波形变化则相对较弱,在剖面上看,层位整体较为平缓,无明显振幅变化。

该方法以多尺度相位信息和地质构造走向信息为约束条件,计算得到的相位相干属性对地下弱小或隐藏构造更加敏感,因此该方法更有利于弱振幅情况下的深层断裂解释。应用于渤海渤中等深层区



(a) 井周沿层位切片的走滑断裂



(b) 垂直于构造方向(红线)的波形变化

图6 地层断裂在不同方向的信息差异性示意

Fig.6 Information difference of formation faults in different directions

域显示,该方法识别横向断裂的尺度达到5~10 m。这样就能为工程提前识别更多薄弱层的信息,为工程优化提供基础信息,进而提高钻井作业的安全性和时效性。

#### 3.2 高温复杂腐蚀环境低成本防腐技术

受海上作业环境、作业机具等条件的影响,我国海上油气井防腐多采用材质防腐。在浅层常规温压条件以及低腐蚀性气体含量情况下,海上采用材质防腐并未导致建井成本大幅提升。随着深层油气开发规模逐步扩大,高温、高压、高腐蚀性流体含量条件下,高等级耐蚀合金需求量的陡增,成本压力急剧上升。为了解决上述问题,寻找既能满足海上全过程井筒完整性要求又能降低成本的长效防腐措施,研发了适合海上应用环境的耐180℃高温缓蚀剂,该缓蚀剂有效解决了S13Cr材质在高温高CO<sub>2</sub>含量、含硫环境下使用常规甲酸盐保护液腐蚀速率过高的问题,为海上油气井由管材防腐逐步优化为化学防腐提供了可行性<sup>[17]</sup>。

#### 3.3 深层潜山极硬地层钻井提速技术

##### 3.3.1 深井钻柱动力学分析与优化控制

针对深层复杂结构井钻井过程中钻柱易发生强度失效的情况,优选钻柱动力学模型,考虑深层复杂结构井井眼轨迹、钻具组合、钻井液性能、钻头-岩

石相互作用和钻柱-井壁碰撞作用,以及钻柱纵、横、扭三向振动与提速工具,建立了超深井及复杂结构井钻柱动力学模型,对模型进行求解可得不同深度处钻柱节点的位移、速度、加速度和接触力等参数,结合第四强度理论得到钻柱最大等效应力,并以钻柱动态安全系数结合振动分级标准,实时、定量评估全井段钻柱安全状态,指导钻井参数优选和钻具组合优化。

针对深层复杂结构井钻井过程中钻速低、钻时长、钻柱易发生疲劳破坏的特点,在分析钻柱动力学特性的基础上,结合钻井现场常见的 4 种裂纹类型(表面半椭圆裂纹、表面线性裂纹、深埋椭圆裂纹、深埋线性裂纹),基于疲劳裂纹扩展理论,建立了含原始缺陷的钻柱疲劳寿命预测模型,形成了基于钻柱动力学的深层复杂结构全井段、含原始缺陷的钻柱疲劳寿命预测方法,首次实现钻具原始缺陷的模拟与定量预测评估<sup>[16]</sup>。

### 3.3.2 基于破岩机理的钻井参数优化方法

以地层特性及钻穿率确定钻头基本属性及参数范围,以能量守恒钻井参数模型确定推荐钻井参数,以钻柱最佳工作状态复核选用钻井参数,多角度科学优化、推荐钻井参数,确保单趟钻获取最大进尺。针对传统机械比能模型在应用中的不足,以钻头与岩石界面为能量输入输出界面,根据能量守恒定律建立钻压、转速优化模型,更加全面、合理考虑多因素对钻井参数的影响,为关键钻井参数优化提供可靠理论基础,如图 7 所示<sup>[18]</sup>。通过钻井参数的科学优化,配套钻头选型与井身结构的优化调整,使钻进渤中区域潜山花岗岩地层时的机械钻速比初期提高了 35%,单只钻头进尺最长超过了 400 m,提速效果十分显著。

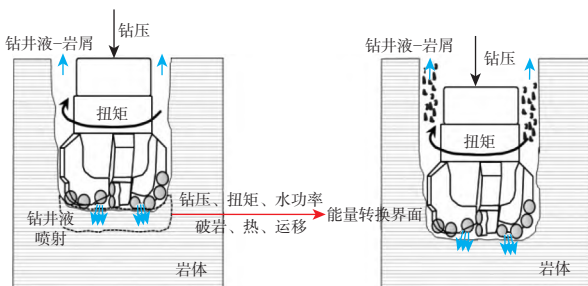


图 7 基于能量守恒定律的硬岩破岩参数优化模型示意

Fig.7 Optimization model of hard rock breaking parameters based on the law of conservation of energy

### 3.3.3 抗高温钻井液高效润滑技术

针对中深部地层温度高、硬地层摩阻大、钻具

损耗快、一趟钻获取进尺短、综合钻进时效低等问题,基于长链有机物与金属原子共价形成高效吸附层,从而起到高效润滑作用的原理,构建了可与钻杆表面原子通过共价键生成高抗剪切吸附层的抗高温钻井液高效润滑技术,扭矩最大可降低 60%,大幅提升钻井流体高温工作性能,降低摩阻对机械能传递的影响,实现流体提速<sup>[18]</sup>。

## 3.4 低渗储层产能释放技术

### 3.4.1 抗 210 °C 高温无固相储层钻液技术

高温环境下储层钻液液的稳定性对储层保护至关重要。为了满足渤中以及南海西部深层油气田温度高达 200 °C 储层钻进的需求,研发了抗 210 °C 可降解液相胶束储层钻液液以及高效助排聚氨防水锁剂。其中,抗高温钻井液中的抗高温淀粉、防水锁剂、抗高温润滑剂等主剂,均为水溶性聚合物,在高温环境下会逐渐降解,基本无黏切。中国海油自主研发的防水锁剂,能够有效降低气水界面张力,预防作业过程中的水锁性伤害,根据试验评价和实际应用结果得知,界面张力由最初的近 14 mN/m 降至近 2 mN/m,表面张力由近 40 mN/m 降为 24 mN/m,储层保护效果大幅提升。实钻应用结果显示,渤中 19-6、渤中 26-6 等深层潜山油气田应用该钻液液后,储层保护中效果良好,储层表皮系数基本在 0 附近,部分井表皮系数为负值。

### 3.4.2 硬地层裸眼侧钻分支井技术

深层油气采用常规井型开发效能低、建井成本高,而储层段侧钻多分支井可以提高开发效率。然而,深部硬地层裸眼开窗侧钻分支井难度极大,需要配套工具及工艺。为此,创新研发以异形齿裸眼锚定器和暂堵自溶通型裸眼空心斜向器为核心的、适用于硬地层的高效裸眼侧钻系统及配套钻完井技术。利用该工具系统及技术,可实现深部极硬地层的开窗侧钻。目前,利用该系统及技术已成功在渤中 19-6 气田应用,并获得高于配产 1.3 倍的产能,效益十分显著。该成果成功拓展了多分支井技术应用的新边界,为海上深层油气“少井高产”开发提供了高效的新路径。

## 4 未来技术发展展望

### 4.1 深水钻完井技术

随着我国深水油气勘探开发步伐进一步加快,“十五五”期间及更远的未来,中国海油在深水钻完井技术领域仍面临诸多需求与挑战:一是现有深

水钻完井工艺和技术尚无法满足深水超浅气层开发、深水深层高温高压工况叠加等复杂场景的安全高效作业要求；二是深水油气钻完井关键核心工具装备及工程设计软件仍主要依赖进口，受卡风险高；三是深远海井控预防及应急救援能力仍存在薄弱环节；四是双碳背景下深海绿色钻完井技术革新及全寿命的深水低成本钻完修井技术需求迫切。为应对未来深水钻完井技术挑战，建议重点聚焦以下6个方向持续开展攻关<sup>[19]</sup>。

1) 深水复杂工程地质条件钻完井关键技术。围绕超深水超浅层、深水深层、深水高温高压等特殊场景技术挑战，开展深水复杂工程地质条件下的钻完井关键技术攻关，推动深水复杂油气田勘探开发进程<sup>[20]</sup>。

2) 深水关键核心工具装备。持续开展3 000 m级水下防喷器及其控制系统、深水隔水管及张紧器系统、深水浮式平台动力定位系统、1 500~3 000 m级水下采油树、深水轻中型修井装备、深水多类型精细控压装备等重大装备研发，以实现关键核心工具装备自主可控，支撑深水油气全面自主作业<sup>[21]</sup>。

3) 深水钻井核心工程设计软件。重点围绕具有深水特殊性的钻井工程核心设计软件需求，对标行业内领先的商业软件，开展超深水隔水管力学分析、深水钻井水力学及井控、深水复杂井多管柱系统力学分析等核心模块研发，形成深水钻井核心设计软件集成平台，逐步实现国产化替代。

4) 深水智能钻完井技术。针对深水钻完井投资高、智能化要求高等特点，重点攻关近钻头测量及高速传输、全电智能完井、井筒智能监测等智能钻完井技术体系，提升深水钻完井全过程井筒智能化控制水平，降低深水井全寿命成本<sup>[22]</sup>。

5) 深远海应急救援能力。井控安全应急保障能力是确保深水钻完井本质安全的关键，亟需持续增强深水安全应急救援的能力。

6) 深水绿色低碳及颠覆性技术。围绕深水富碳油气区块绿色开发需求，开展水下井口模式CO<sub>2</sub>注入、封存效果及安全风险监测检测方面的基础理论和关键技术研究。同时，开展深水颠覆性钻井技术研发，如深水无钻机钻井技术等。

## 4.2 海上深层钻完井技术

近年来的勘探发现成果已经表明，海上深层、超深层油气资源前景广阔，但受高温、超高温、极硬地层以及低渗低品位储层的限制，深层超深层油气勘探开发面临更加复杂与苛刻的钻井环境<sup>[23]</sup>。

1) 超高温给工具以及工作流体带来影响。如渤海渤中一些勘探目标，设计垂深接近6 500 m，预测井底温度高达248 ℃，在该温度条件下，现有工作流体及测井工具均难以满足其钻井及储层评价的需求。因此，为了满足未来勘探开发要求，亟需发展超高温钻井液、定向井以及测井工具。

2) 极硬地层给钻井作业效率带来严峻挑战。近年在黄海实施的一口深井显示，在高应力环境及古老沉积地层叠加影响下，现有钻井提速技术手段均难以有效提高极硬地层的机械钻速。在海上高作业日费的环境下，单日进尺不足50 m的钻探效率难以满足中低丰度储层的经济开发要求。因此，加强高温、高应力环境、高抗压强度极硬地层破岩机理、破岩钻头及配套提速工具的研发是另一技术需求方向。同时，对于极硬地层的钻井参数自动寻优、智能化导航钻进系统也存在极大需求。

3) 深层超深层通常为低渗、特低渗储层，如何提高该类储层的单井产能是未来面临的又一难题。虽然目前已经发展了硬地层裸眼高效侧钻系统，但在更高温、更高强度地层钻进时，如何提高侧钻工具的可靠性及效率，如何在复杂结构井型基础上进一步提高单井产能，是必须攻克的另一技术难题。

## 5 结束语

深水及海上深层油气开发不仅是我国能源战略的核心支柱，更是全球能源格局重构背景下彰显国家科技实力与产业竞争力的关键领域。历经多年攻坚，中国海油在深水超深水钻完井技术领域实现了从跟跑到并跑的历史性跨越——1 500 m级深水自主作业能力的确立、“深海一号”超深水大气田的崛起、渤海深层潜山油气田的高效开发，不仅标志着我国海洋油气工业迈入国际先进行列，更以自主创新的技术体系为全球复杂油气资源开发提供了“中国方案”，是国家“海洋强国”战略的生动实践。面向未来，深水与海上深层钻完井技术必将肩负更为宏大的使命。中国海油将持续聚焦超高温高压、超深层、低渗低品位等复杂领域的技术攻关，大力研发关键核心工具、全生命周期低成本防腐、智能钻完井等前沿技术，不断提升深水及海上深层钻完井关键技术与工具装备的自主可控能力，持续深耕深水与深层油气开发技术的“无人区”，打造全链条技术体系，为我国能源安全保障筑牢深海屏障。

## 参 考 文 献

## References

- [1] 谢玉洪. 中国海洋石油总公司油气勘探新进展及展望[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(1): 26-35.  
XIE Yuhong. New progress and prospect of oil and gas exploration of China National Offshore Oil Corporation[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(1): 26-35.
- [2] 刘书杰, 谢仁军, 全刚, 等. 中国海洋石油集团有限公司深水钻完井技术进展及展望[J]. 石油学报, 2019, 40(增刊 2): 168-173.  
LIU Shujie, XIE Renjun, TONG Gang, et al. Progress and prospect of deepwater well drilling and completion technique of CNOOC[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(supplement 2): 168-173.
- [3] 李中. 渤海深层探井钻井关键技术现状及展望[J]. 钻采工艺, 2024, 47(2): 35-41.  
LI Zhong. Challenges and technology trends prediction of deep exploration well drilling in Bohai Sea[J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(2): 35-41.
- [4] 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 for "Deep Sea No. 1" ultra-deepwater gas field[J]. China Petroleum Enterprise, 2024(3): 40-46.
- [5] 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 Technology, 2023, 51(4): 88-94.
- [6] 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 LS 17-2 Gas Field[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(5): 130-135.
- [7] 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 Shujie, WU Yi, XIE Renjun, et al. Development and prospect of the key technologies for the drilling of deep wells in deep water[J]. Drilling and Production Technology, 2021, 43(2): 139-145.
- [8] 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 Jin, FU Chao, LIU Shujie, et al. Key technological innovation and practice of well construction in ultra-deepwater shallow formations[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(10): 1500-1508.
- [9] 赵金海, 张洪宁, 王恒, 等. 中国石化超深层钻完井关键技术挑战及展望[J]. 钻采工艺, 2024, 47(2): 28-34.  
ZHAO Jinhai, ZHANG Hongning, WANG Heng, et al. Key technical challenges and prospects of drilling and completion in ultra-deep reservoirs, Sinopec[J]. Drilling and Production Technology, 2024, 47(2): 28-34.
- [10] 马英文, 曹砚锋, 邱浩, 等. 中国海油中深层油气田完井技术现状及展望[J]. 中国海上油气, 2024, 36(5): 146-156.  
MA Yingwen, CAO Yanfeng, QIU Hao, et al. Status and prospects of well completion technologies for middle-to-deep oil and gas fields of CNOOC[J]. China Offshore Oil and Gas, 2024, 36(5): 146-156.
- [11] ZHANG Ziheng, YIN Xiaokang, SUN Chaoqiang, et al. Gas kick monitoring in deep-water drilling risers based on ultrasonic Doppler spectroscopy[J]. Ocean Engineering, 2025, 321: 120457.
- [12] 李军, 杨宏伟, 张辉, 等. 深水油气钻采井筒压力预测及其控制研究进展[J]. 中国科学基金, 2021, 35(6): 973-983.  
LI Jun, YANG Hongwei, ZHANG Hui, et al. Progress of basic research on wellbore pressure control in deepwater oil and gas drilling and production[J]. China Science Fund, 2021, 35(6): 973-983.
- [13] WANG Jiawei, ZHANG Zhi, CHEN Xiang, et al. Research on the impact of overflow well shut-in on wellbore integrity and safety[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 243: 213304.
- [14] 曹砚锋, 李汉兴, 黄辉, 等. 海上油田高效开发钻完井关键技术研究新进展[J]. 中国海上油气, 2022, 34(6): 124-134.  
CAO Yanfeng, LI Hanxing, HUANG Hui, et al. Research progress on drilling and completion technology for efficient development of offshore oilfields[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(6): 124-134.
- [15] 孙金声, 刘伟, 王庆, 等. 万米超深层油气钻完井关键技术面临挑战与发展展望[J]. 钻采工艺, 2024, 47(2): 1-9.  
SUN Jinsheng, LIU Wei, WANG Qing, et al. Challenges and development prospects of oil and gas drilling and completion in myriametric deep formation in China[J]. Drilling and Production Technology, 2024, 47(2): 1-9.
- [16] 刘岩生, 张佳伟, 黄洪春. 中国深层—超深层钻完井关键技术及发展方向[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 312-324.  
LIU Yansheng, ZHANG Jiawei, HUANG Hongchun. Key technologies and development direction for deep and ultra-deep drilling and completion in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 312-324.
- [17] LIU Yuping, ZHOU Yanyu, WANG Wenzhe, et al. Synergistic damage mechanisms of high-temperature metal corrosion in marine environments: a review[J]. Progress in Organic Coatings, 2024, 197: 108765.
- [18] 周长所, 杨进, 幸雪松, 等. 基于机械比能理论的渤海深层钻井参数优化[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(6): 693-697.  
ZHOU Changsuo, YANG Jin, XING Xuesong, et al. Optimizing drilling parameters of deep formations in the Bohai Basin based on mechanical specific energy theory[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(6): 693-697.
- [19] 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 Zhengli, HU Weijie. Countermeasures and challenges of deepwater drilling and completion technology in South China Sea[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(1): 8-12.
- [20] SUN Jinsheng, YANG Jingbin, BAI Yingrui, et al. Research progress and development of deep and ultra-deep drilling fluid technology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 1022-1034.
- [21] 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 Zhong, XIE Renjun, WU Yi, 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.
- [22] 李根生, 宋先知, 祝兆鹏, 等. 智能钻完井技术研究进展与前景展望[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 35-47.  
LI Gensheng, SONG Xianzhi, ZHU Zhaopeng, et al. Research progress and the prospect of intelligent drilling and completion technologies[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 35-47.
- [23] 汪海阁, 葛云华, 石林. 深井超深井钻完井技术现状、挑战和“十三五”发展方向[J]. 天然气工业, 2017, 37(4): 1-8.  
WANG Haige, GE Yunhua, SHI Lin. Technologies in deep and ultra-deep well drilling: present status, challenges and future trend in the 13th Five-Year Plan period (2016-2020)[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(4): 1-8.

# 海洋深水深层工程技术专刊



**范白涛**  
特约主编

中国海洋石油有限公司工程技术部副总经理，正高级工程师，享受国务院特殊津贴专家。长期从事海洋油气钻完井技术研究与管理工作，是我国海洋油气钻完井技术领域的领军人才。在中国海油海上油气田勘探开发中，创建了完整的防砂工艺技术体系，突破了密集丛式井网防碰技术，组织了“优快”钻完井技术创新应用，推动了我国首个自主研发的浅水水下采油树系统示范应用，参与了全球最大压裂船“海洋石油696”设计建造工程；在深水领域，主导了我国首个1500米自营超深水-陵水17-2-气田钻完井技术攻关，建立了深水探井转开发井科学评估方法及理论。先后获得省部级科技奖励21项、厅局级奖励30余项，出版专著4部，获国家专利30余项，荣获“海上大庆油田”建设立功个人二等功、中国海油十佳青年技术能手、孙越崎青年科技奖等荣誉，为我国海洋油气高效开发作出了突出贡献。

中国石油大学（北京）安全与海洋工程学院院长，二级教授，海洋钻井领域技术专家，海洋油气工程国家一流专业主要创建者和学术带头人，作为三大主干专业之一支撑石油与天然气工程学科连续7年全球排名第一。深耕海洋钻井理论和技术研究30余年，依托国家科技重大专项、重点基金等，主持创立了深水浅层钻井、海洋隔水导管设计及作业控制、深层安全高效钻井等理论体系和关键技术，支撑建成我国海洋深水、浅水及深层等多个领域重大工程，引领了海洋油气工程专业及理论技术发展方向。成果获国家科技进步一等奖3项、国家技术发明二等奖2项、省部级及行业协会科技进步特等奖7项，制定国际标准1部、行业及企业标准2部，获发明专利89件，出版专著7部（教材2部），发表论文170余篇。



**杨进**  
特约主编



**谢仁军**  
特约副主编

中海油研究总院有限责任公司钻采研究院副院长，博士，正高级工程师，主要从事海洋油气钻井技术与工程设计实践工作，在深水、高温高压、稠油热采等海洋复杂油气领域及海洋钻井-岩土交叉学科研究方面取得重要成果，主持完成我国首个海上高温高压气田群、“深海一号”超深水大气田等为代表的重大工程钻采技术方案研究，牵头制定海洋隔水导管ISO国际标准。获国家科技进步一等奖及技术发明二等奖各1项，入选国家高层次人才计划，荣获中国青年五四奖章、孙越崎青年科技奖等称号。

中国石油大学（北京）安全与海洋工程学院副教授，主要从事海洋油气钻采安全领域的基础和应用基础研究。入选“博新计划”、北京市青年人才托举工程、中国石油大学（北京）青年拔尖人才和石大学者，主持多项国家自然科学基金面上项目、国家自然科学基金青年项目和国家重点研发计划课题，研究成果发表于《SPE Journal》《Process Safety and Environmental Protection》等国际知名期刊，部分成果被油气行业知名杂志JPT报道。获省部级及社会力量科技特等奖5项、一等奖2项，获校级教育教学成果特等奖1项、一等奖1项，教育教学成果入选教育部研究生教育工程案例。



**殷启帅**  
特约副主编