

doi:10.11911/syztjs.2023036

引用格式: 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 Laibin, XIE Renjun, YIN Qishuai. 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.

深水油气开采风险评估及安全控制技术 进展与发展建议

张来斌^{1,2}, 谢仁军^{1,2,3}, 殷启帅^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京), 北京 102249; 2. 应急管理部油气生产安全与应急技术重点实验室, 北京 102249; 3. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

摘 要: 深水油气资源是国际油气勘探开发的主战场和技术争夺的制高点, 南海深水油气资源丰富, 但面临更恶劣的深水海洋环境、更复杂的浅层地质灾害、更具挑战的深层地质条件和更苛刻的深水油气开采工况, 致灾机理复杂, 作业风险极高, 探索适用于南海深水油气开采的风险评估及安全控制技术体系, 是确保深水油气安全高效开采的关键。针对深水油气开采面临的海洋环境、浅层灾害、深层地质、气井开采等四大挑战, 通过技术攻关与工程实践, 形成了具有南海特色的深水油气开采风险评估基础理论及关键技术体系, 包括深水海洋环境风险评估与控制、深水浅层地质灾害预测与控制、深水钻井井控与应急救援、深水油气开采设施安全检测及监测等关键技术, 指出超深水、深水深层、深远海等待勘探领域亟需解决复杂井作业风险高、关键核心装备和工程软件依赖进口、深水安全环保要求极高、数字智能化转型迫切等重大问题, 提出了持续追求本质安全、推进关键装备和工程软件的国产化、增强高效风险防控与应急能力、智能化保安全等发展建议, 以进一步推动深水油气开采风险评估及安全控制技术的发展与进步, 实现南海深水油气安全、高效、自主、可控开发。

关键词: 深水油气开采; 风险评估; 安全控制; 海洋环境; 浅层建井; 深水井控; 结构监测

中图分类号: TE58 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2023)04-0055-11

Technical Progress and Development Suggestions for Risk Assessment and Safety Control of Deep-Water Oil and Gas Exploitation

ZHANG Laibin^{1,2}, XIE Renjun^{1,2,3}, YIN Qishuai^{1,2}

(1. China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. Key Laboratory of Oil and Gas Safety and Emergency Technology, Ministry of Emergency Management, Beijing, 102249, China; 3. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing, 100028, China)

Abstract: Deep-water is the main battlefield of international oil and gas exploration and development and the pinnacle of technological competition. Although the deep-water oil and gas resources in the South China Sea are abundant, they confront a harsher marine environment, more complex shallow geological disasters, more challenging deep geological regimes, and more demanding exploitation conditions. In addition, the disaster-triggering mechanisms are complicated, and the operational risk is high. Hence, a technical system for risk assessment and safety control of oil and gas exploitation in the South China Sea is the key to ensuring the safe and efficient development of deep-water oil and gas. In this paper, a system for the basic theory and key technologies to assess the risks of deep-water oil and gas exploitation in the South China Sea was established on the basis of technical breakthroughs and engineering practice. Aiming to tackle the challenges of the marine environment, shallow-formation hazards, deep-formation geology, and gas well exploitation risks confronted, this system incorporated key technologies regarding the risk assessment and control of the deep marine environment, deep-water shallow geological disaster prediction and control, deep-water well

收稿日期: 2023-01-28; 改回日期: 2023-02-09。

作者简介: 张来斌 (1961—), 男, 安徽铜陵人, 1982 年毕业于华东石油学院石油矿场机械专业, 1985 年获华东石油学院北京研究生部石油机械专业硕士学位, 1991 年获石油大学(北京)机械工程专业博士学位, 教授, 中国工程院院士, 主要从事油气生产安全研究。系本刊编委。E-mail: zhanglb@cup.edu.cn。

基金项目: 中国工程院咨询研究重点项目“油气工程技术 2035 发展战略研究”课题 5“油气生产安全与保障技术发展战略研究”(编号: 2018-XZ-09-05)、国家自然科学基金项目“深水钻井气侵运移规律与气侵速率表征研究”(编号: 52101340)联合资助。

control and emergency rescue, safety detection and monitoring protocols for exploitation facilities in deep-water oil and gas operations, etc. Moreover, major problems seeking urgent solutions were pointed out for such to-be-explored areas as ultra-deep water, deep formations in deep water, and the open sea. These problems included high operational risks of complex wells, dependence on the import of key and core equipment and engineering software, demanding requirements for deep-water safety and environmental protection, and an urgent need for digital and intelligent transformation, etc. On this basis, the following development suggestions were put forward: continuous pursuit of intrinsic safety, localization of key equipment and engineering software, stronger efficient risk prevention and control and emergency response capabilities, and intelligent safety, etc. These suggestions are expected to promote the technical advance in risk assessment and safety control of deep-water oil and gas exploitation and achieve safe, efficient, independent, and controllable exploitation of deep-water oil and gas in the South China Sea.

Key words: deep-water oil and gas exploitation; risk assessment; safety control; marine environment; well construction in shallow formations; deep-water well control; structure monitoring

南海油气资源量高达 700×10^8 t, 其中 70% 蕴藏在深水, 深水油气的勘探开发已成为我国能源的重要接替区和增长级^[1], 但周边国家盗采严重, 已形成了超 $6\,300 \times 10^4$ t/a 的产能。可见, 开发深水油气势在必行, 也是保障国家能源安全、维护我国南海海洋权益和建设海洋强国的迫切需要。

深水开采具有高风险、高投入、高技术、高收益(“四高”)的特点, 安全是深水油气开采的生命线^[2]。2010年, 美国墨西哥“深水地平线”井喷爆炸事故导致“船毁人亡”, 11人失踪, 并引发生态灾难, 沿岸 1 609.344 km 湿地和海滩被毁, 经济损失超过 700 亿美元, 给世界深水油气开采敲响警钟。我国通过跟踪学习、合作引进和自主创新 3 个阶段, 实现了从浅水到深水、从深水到超深水、从深水勘探到深水开发的重大跨越^[3-4]。经过多年持续技术攻关, 相继攻克了一批深水油气开采风险评估及风险防控关键技术, 有力支撑了我国南海深水钻探的安全高效实施。但随着勘探不断深入, 内波流、土台风等海洋环境更加恶劣, 超深水、井底高温高压、深层花岗岩等钻探条件更加复杂, 导致深水油气开采风险不断升高^[5-6]。笔者系统总结了南海深水油气开采风险识别及安全控制的前期研究进展及应用效果, 并针对南海超深水、深水高温高压、深水深层、深远海等高风险区域的开采难题, 在持续追求本质安全、推进核心装备国产化替代、增强高效风险防控与应急能力、智能化转型等方面提出了发展建议, 以进一步推动深水油气开采风险识别及安全控制技术的发展与进步, 实现南海深水油气安全、高效、自主、可控开发。

1 南海深水油气开采风险评估及安全控制主要技术难点

我国南海地处三大板块交汇处^[7-8], 地层条件复

杂, 面临深水与区域高温高压、深层花岗岩等多重挑战^[9]。南海深水油气开采面临海洋环境、浅层灾害、深层地质、气井开采等四大挑战, 致灾机理复杂, 作业风险极高。

1.1 深水海洋环境更恶劣

南海每年发生 10 余次台风与极端波浪, 内波流和洋流叠加后流速达 5 节以上, 综合环境条件极为恶劣。南海深水油气开采具有水深、离岸远、台风多(尤其土台风)和内波强等特点, 浪大流急、内波季风频发(见表 1), 对深水钻井平台产生诸多影响^[10-12], 并且目前深水海洋环境监测数据相对比较缺乏。南海台风季节长、频次高、强度大、危险性高、避台周期长达 10~15 d; 季风持续时间长, 物资保障难度大; 南海海域内波流发育, 且难以预测, 流速最快可达 2 m/s, 威力巨大。

表 1 不同地区的海洋环境因素对比
Table 1 Comparison of marine environmental conditions in different areas

环境因素	墨西哥湾	北海	西非	南海
台风/飓风	√			√
冬季风		√		√
涌浪(低频波)			√	√
内孤立波				√

近年来, 国内外深水钻井平台在南海作业期间遭遇多起台风及内波流事故, 导致钻井平台漂移、应急解脱、钻具剪切、隔水管解锁、隔水管内钻井液排海、钻井平台走锚、张力绳断裂和伸缩节倾斜等复杂情况, 损失惨重。

1.2 浅层地质灾害更复杂

深水浅层建井面临浅层气、浅水流、天然气水合物(“三浅”)等地质风险挑战^[13]。2019年, 南海某井钻井作业过程中浅层气从地层喷涌而出, 通过

在该井四周钻领眼,才解决了该井浅层气的风险。此外,南海油气区的浅部未成岩、弱固结地层常伴有天然气水合物分布,主要赋存于泥质粉砂等细粒沉积物中,与浅层气、下伏气和游离气耦合共生。南海的陵水、永乐等区块有多口深水井在钻探过程中发现了厚度几米至数十米的天然气水合物层,某深水井钻井作业过程中,ROV(水下机器人)观测到表层导管与泥线界面处发生了严重气窜,发现井口附近地层发生了不均匀沉降和开裂,表层导管出现倾斜并在基盘处形成了新的天然气水合物,严重影响了后续作业安全。

深水浅层土质松软,海床不稳定,井口易失稳下沉。2012年,流花油气田某井(水深754 m)井口下沉2.50 m,导致井眼报废、更换井位,损失超过5000万元。2014年,西非某井固 $\phi 508.0$ mm套管前循环时井口下沉2.00 m,严重影响了作业效率。

南海深水海底构造复杂,发育海山、海丘、海槽、海沟、海谷和陡坡等地貌类型,地形起伏大,海底陡峭,最大倾角高达 30° ,存在较大边坡滑塌风险,钻井工程安全面临严峻的挑战。复杂海底地貌环境下的建井作业越来越频繁,地质勘探有时将井位选在不稳定海床区域,由于缺乏不稳定海床喷射建井的安全性评估方法,钻井施工通常采用将井位更换至平坦区域的方式来规避斜坡海床,甚至与设计井位偏移较大距离,造成地质勘探效果欠佳。

1.3 深层地质条件更具挑战

南海地处欧亚、太平洋和印澳板块交汇处,地质构造复杂,受地质构造断裂交汇影响,高压成因复杂,难以准确预测。南海是深水 and 高温高压两大因素主控的盆地,给钻井作业带来巨大挑战。海水代替上覆岩石压力,破裂压力低,安全密度窗口极窄,如南海某口深水高温高压井安全密度窗口仅 0.03 kg/L,钻井过程中气侵溢流事故频发^[14]。南海深水地层年代新,沉积速率快,成岩性差,承压能力弱,易井漏,井控风险高,处理难度大。深水海况恶劣,浮式钻井平台升沉摇摆幅度大,受呼吸效应干扰,难以监测早期溢流。海底温度低,造成钻井液流变性变差,导致压力难以传递,关井求压困难。井底侵入流体一旦越过水下防喷器组,将造成灾害性后果。压井阻流管汇长,管线摩阻大,压力窗口窄,易压漏地层。2015年,南海某井 $\phi 311.1$ mm井段钻进中钻速突增,钻压骤降,1 min后早期井涌监测系统报警,钻井液计量罐液面快速升高,判断发生溢流,紧急关井、关防喷器,套压迅速升高,随后

骤降,然后逐渐趋于稳定,判断地层发生漏失,最终井眼报废。

1.4 深水油气开采工况更苛刻

深水油气开采环境恶劣,开采设施安全及完整性检测、监测技术及装备面临巨大挑战。深水油气开采设施长期处于动态变化的工程地质环境中,更加容易受到各种因素的破坏和干扰。由于承受复杂海洋动力环境的作用及周围海上活动造成的外力损伤等,深水油气开采设施的安全运营条件具有高度时空变化及不可预见性,在物理、化学、机械等因素的影响下,将会发生不同程度的腐蚀、损伤、变形、冲刷、偏移和悬跨等缺陷,导致损伤累积,严重时出现渗漏、穿孔、破裂和断裂,引发溢油事故^[15]。深水油气开采设施泄漏具有不可见、节点广、形式复杂、检测难和信号易受环境干扰等特点,陆上泄漏的检测方法大多不适用于深水油气开采设施,深水油气开采设施泄漏的早期实时、在线和全面监测是一个难题,国内外尚未取得重大突破。

井筒泄漏是困扰气井安全开发的重要难题,在油气田开发中后期井筒发生泄漏的现象尤为严重。井筒泄漏,不仅使 CO_2 和 H_2S 等腐蚀性气体进入油套环空腐蚀油管外壁及套管内壁,而且会导致套管长时间承受高压,即出现环空带压。环空带压将严重威胁油气井安全生产,严重时存在天然气窜漏至地层、泄漏至井口的风险,甚至引发灾难性事故。

海洋结构物长期在海水中服役,由于腐蚀、生物附着、复杂应力、外力破坏和风暴等原因,结构物表面容易产生裂纹、腐蚀等缺陷,且缺陷种类繁多、形貌复杂,导致原来的交流电磁场检测方法不适用于检测上述缺陷,加上水下附着物的干扰,给水下无损检测技术带来诸多挑战。

海洋油气开采设施的关键构件如隔水管等,受复杂工况和海洋环境的影响,承受恶劣动载作用易于产生疲劳,一旦突发断裂将导致灾难性后果。然而,受早期损伤信号微弱难以辨识、设施结构复杂、水上水下及井筒作业条件恶劣等因素的制约,隔水管疲劳的早期诊断难度极大。国外开发的隔水管内外检测探伤装置以检测腐蚀和壁厚为主,并不具备诊断早期疲劳的能力,作业水深局限于200 m;国内开发的隔水管疲劳在线监测系统局限于工况监测,无法反映隔水管的实际损伤状态,实际生产中主要采用常规探伤手段,在陆基码头检测处于拆卸状态的隔水管,不但需要支付钻井平台至码头的高额转运费用,还存在着探伤周期长、工艺复杂、效率低、

人工成本高和无法反映早期疲劳等问题。

2 南海深水油气开采风险评估及安全控制技术进展

为满足南海深水油气安全高效开采需求,针对南海深水油气开采特点,通过“产学研用”协同攻关,初步形成了具有南海特色的深水油气开采风险识别基础理论,探索了适用于南海深水开采的安全控制技术体系,有力支撑了我国南海深水油气开采的安全高效实施^[16]。

2.1 深水海洋环境风险评估与控制技术

针对南海台风、内波频发等挑战,形成了深水环境风险评估与控制技术,为实现深水油气安全开采提供了重要前提和可靠手段。

2.1.1 深水作业防台安全控制关键技术

基于南海近70年台风规律,形成了海气耦合模式,预报南海地区季风槽内的热带气旋生成、发展和移动趋势,降低了初始条件和模式不确定性对预报结果的影响,具有预见期长(1~10 d)、高分辨率和多源四维资料同化的优势,可以有效消除系统性和非系统性误差(观测误差)。

基于台风规律和早期预报结果,采用划分警戒区和 T-time (台风准备时间,指将井底钻具组合起出井筒,完成钻井平台和井口脱离、回收隔水管,做好平台撤离准备所需要的时间)相结合的方法,形成了综合考虑锚泊定位和动力定位模式的深水钻井防台策略^[10,17],明确了防台警戒区(见图1),其包括绿色警戒区(准备区)、黄色警戒区(行动区)和红色警戒区(撤离区)。处于绿色警戒区(准备区)时,保持正常作业,做好防台风动员,落实防台物资。处于黄色警戒区(行动区)时,按照作业者代表的指令,停止钻井作业,进行井眼保护和作业人员撤离的工作。处于红色警戒区(撤离区)时,锚泊定位模式下,人员全部撤离完毕;动力定位模式下,留下必

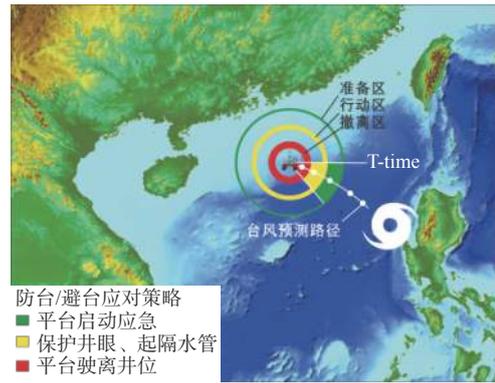


图1 深水钻井防台警戒区

Fig.1 Typhoon warning area in deep-water drilling

要的操船人员和设备维护人员,开动平台,驶离台风影响区域。

2.1.2 南海内波实时监测与安全控制技术

在内波传播路径上布放1~2套内波实时监测预警浮标系统,实时监测内波的传播速度、方向、强度,以及同步预报内波袭击平台的时间和方位^[18],并通过通讯卫星,将相关信息实时传送至海洋石油钻井平台。基于声学多普勒流速剖面仪的直接监测与基于合成孔径雷达的间接监测结合,能提前2~8 h预报内波流经过的方向及强度,并能监测内波,根据预报结果和监测结果制定深水钻井内波应对策略(见表2),实现了内波实时监测预警(平台-水体-岸基三位一体),有效应对了数百次内波的侵袭,保障了作业安全^[19]。

接收内波预警后,及时将钻井平台艏向对准内波流方向,根据流速调节推进器功率,完成各项安全部署,有效保障了海上作业安全。使用孤立内波监测早期预警系统,保持8台推进器24 h在线运行,增加动力定位警报测试频次,进行平台定位失控应急解脱演习,守护船提前待命观测孤立内波强度,开启X波段雷达作为辅助手段。现场作业方面,钻井平台上的人员提高内波流危害的警惕性,在钻井平台作业区域附近投放监控信标,制定防范

表2 深水钻井内波应对策略

Table 2 Internal wave response strategy during deep-water drilling

内波等级	波致流流速/(m·s ⁻¹)	波致流加速度/(km·s ⁻²)	应对措施
弱	$u < 0.8$	$a < 3$	记录内波信息,平台不需要采取应对措施
中	$0.8 \leq u < 1.0$	$3 \leq a < 4$	监测预警系统发出警报,但是平台不需要采取应对措施
强	$1.0 \leq u < 1.5$	$4 \leq a < 5$	监测预警系统发出应急响应,将平台船头朝向调整为内波来向,以减少侧面冲击力
非常强	$u \geq 1.5$	$a \geq 5$	停止一切水下作业

内波流应急预案, 加强演习和演练, 通知守护船在内波流来向进行监控。

2.2 深水浅层钻井风险识别与安全控制技术

深水钻井工程实践表明, 60% 的钻井事故缘于海底以下几百米浅部地层, 浅层钻井顺利相当于深水钻井成功了一大半, 因此, 亟需开展深水浅层钻井风险识别研究, 解决浅层钻井设计与安全控制的关键难题^[20]。

2.2.1 深水浅层地质灾害识别与安全控制技术

深水浅层钻井中普遍存在“三浅”地质灾害, 需要识别其赋存区域及规模, 针对潜在的工程危害提出针对性的防控措施。

“浅层气”地质灾害控制方面, 基于对浅层气喷发速度、喷发高度、喷发时间与其压力、体积的变化规律^[21-22], 建立了无隔水管钻井井筒压力精确预测方法^[23-24], 形成了“无风险, 连续钻进”“低风险, 动态压井”“中风险, 钻领眼”“高风险, 钻导眼”和“极高风险, 定向井”的浅层气风险五级防控技术(见图 2)^[25-29]。2015 年荔湾某井采用钻领眼技术、2019 年永乐某井采用钻导眼技术, 都成功防控了浅层气地质灾害, 确保了深水浅层钻井作业的安全。

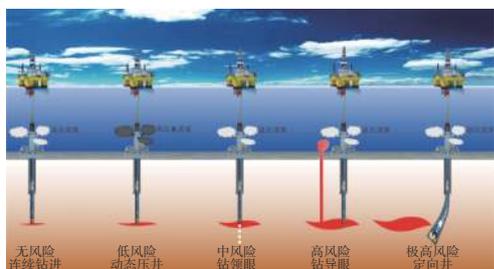


图 2 浅层气风险五级防控技术

Fig.2 Five-level control technology for gas hazards in shallow formations

“浅水流”地质灾害风险识别方面, 基于遗传算法的叠前全波形反演预测纵横波速度和泊松比, 识别浅水流超压, 形成了预测浅水流的基于遗传算法的叠前全波形反演方法^[30], 建立了基于纵横波速度比的浅水流砂体超压定量预测方法, 定量评估浅水流砂体灾害效应, 量化分级标准^[31]。“浅水流”地质灾害控制方面, 对“低、中、高”风险区采取分级防控措施: 低风险区域, 可通过优化井身结构进行防控, 将套管下深设计在高压浅水流层位之上。中风险区域, 通过钻领眼进行控制, 即先使用小直径钻头钻领眼至设计表层套管下深, 确定浅水流的

埋深和流量, 再离开原井位重新进行导管安装作业; 如无浅水流或其流量极小, 可正常下导管和表层套管; 若浅水流有一定危害程度, 应先下导管固井, 再安装隔水管和防喷器, 采用领眼钻具组合钻导眼, 再进行扩孔作业, 如有需要采用动态压井法进行压井作业。高风险区域, 直接更换井位, 避开浅水流地层进行深水钻井作业。

“天然气水合物”地质灾害风险识别方面, 将海底地震仪横波信息与常规反演方法相结合, 创新提出了三维地震天然气水合物识别与刻画方法, 提高了砂岩型天然气水合物的预测精度, 了解了南海天然气水合物的形成条件和分布情况。通过数值模拟和室内试验, 得知海流速度小于 0.35 m/s 的区域易生成天然气水合物, 而泥线附近的水下井口在该区域, 因此其为防范天然气水合物的重点区域。建立了天然气水合物分解致灾定量评估方法, 定量评估了不同钻井工况下天然气水合物分解致灾情况, 制定了针对性防范措施, 并设计了防控装备^[32]。

“天然气水合物”地质灾害控制方面, 浅层建井阶段在井口加装防天然气水合物导流罩, 更换井口连接器锁紧块下部密封圈, 以确保密封效果; 提高水下防喷器控制液中乙二醇的含量, 确保控制液不会因为管线外部覆盖天然气水合物而冻结; 水下机器人持续进行水下观察, 确认气体的量是否有增大趋势, 同时观察连接器喇叭口处是否有天然气水合物; 如果发现天然气水合物, 水下机器人采用机械臂进行清理。安装隔水管和闭路循环阶段, 采用水基恒流变钻井液。

2.2.2 喷射法安装表层导管技术

针对深水表层作业面临的浅层土质疏松、破裂压力低和海底温度低等难题, 形成了集原理、设计方法、作业控制及软硬件于一体的喷射法安装表层导管技术体系^[33-38], 其包括表层导管下入深度设计方法, 喷射钻头与表层导管的尺寸配合, 喷射导管下入后静止时间的确定, 导管下入过程中合理钻压参数确定、导管强度校核和稳定性分析。基于对区域地层强度的认识, 优化钻头伸出量和喷射参数, 荔湾 22-1-1 井的钻头伸出量由 120.7 mm 优化为 149.2 mm、排量由 4 100 L/min 优化为 5 000 L/min, 大幅度提高了导管喷射下入的效率, 有力保障了高效建井。该井创造了多项纪录^[39]: 西太平洋钻探作业水深最大(2 619.35 m), 西太平洋深水表层导管入泥深度最大(100.10 m), 西太平洋深水表层导管安装时间最短(2.25 h)。

2.2.3 不稳定海床表层建井风险分析

基于南海深水区井场环境特征,根据喷射对周围土体的扰动程度,综合考虑海床倾角、土质黏聚力、土质内摩擦角和土质分层的影响,建立了均质单层、底部为硬土质、含软弱夹层的三层不稳定海床地质模型^[40]。基于二维/三维地震快速识别、微地貌识别和井场海底滑坡精细预测等综合地球物理技术,形成了深水海底滑坡灾害识别与预测技术^[41]。利用该技术识别和刻画了白云海底滑坡和华光海底滑坡,对南海北部海底滑坡进行了全面识别与预测,指导了深水钻井井场选址,完成了松涛、宝岛、陵水等区块深水钻井井场地质灾害评价与预测,保障了深水钻井安全,深水作业最大允许坡度由 3° 拓展到 6° ^[42]。

2.3 深水钻井井控与应急救援关键技术

针对深水井控识别难度大、控制风险高等难题^[43-44],形成了集基础理论、设计方案和国产化装备于一体的深水钻井井控与应急救援关键技术。

2.3.1 深水钻井气侵溢流早期识别技术

研制了水下溢流早期监测装置,设计了深水水下溢流监测装置的安装、通讯和供电系统,开展了深水水下溢流监测数据采集及信息挖掘,建立了早期溢流水下识别方法,并进行了水下溢流早期监测装置原理样机和工程样机的试验。研制了基于“水上、水下、井下”多源监测数据融合分析算法的深水钻井井口安全监控及井喷智能预警系统^[45-48],为深水油气开发提供了技术支撑和安全保障。

2.3.2 深水井喷失控场景构建

针对深水油气开发环境和地质条件的复杂性及钻井作业过程中可能遇到的灾难事故,将海上浮式钻井船钻井可能发生的井喷事故归纳为7种情景:情景1,浅层气失控;情景2,平台失位情况下的井喷;情景3,井喷失控——防喷器失效平台未着火;情景4,井喷失控——平台着火;情景5,平台爆炸着火倾覆;情景6,特殊井喷失控——隔水管内溢流,旋转防喷器失效;情景7,特殊井喷失控——井喷失控,管外窜流。基于深水钻井井喷失控情景构建,采用理论分析、逻辑推理等方法,对深水钻井井喷失控风险等级进行评价。结合现有的应急救援能力和技术优化设计应急救援方案,提高井喷失控应急处置能力,形成深水井喷失控应急技术方案^[49]。

2.3.3 深水救援井设计技术

针对深水救援井的特点和南海自然作业环境,进行救援井井位优选、救援井井眼轨道设计、管柱

设计和对接技术研究,形成了我国深水领域救援井技术^[50-54]。综合考虑海况、海底构造、地质危害、井喷流出物、气体散布、热辐射、烟、海洋气象、救援井钻井难度、地应力方位和钻井平台作业能力等因素优选救援井井位;采用Bypass——救援井井眼轨道设计方法,在连通前的钻进过程中先找到并“路过”被救援井的井眼轨迹,以消除误差椭圆顺利连通;钻进过程使用主动探测定位系统的同时,使用被动探测定位系统(PMR软件),增大测距定位测量密度,提高探测准确度;根据压井模拟计算结果,开展井身结构及套管程序设计,选择合适的套管进行压井作业,选择合适的套管壁厚,以满足压井作业中的压力要求;结合现场钻井需求,充分考虑被救援井的地质特征、压力、温度和工程实际,设计钻井液与压井液;综合考虑拦截深度、救援井位置约束条件、位置不确定性、救援井井眼轨迹、套管设计、钻井程序和压井程序,选择连通点,优选连通方案;基于压井连通点位置、压井液密度、压井液体积、压力限制、水力连通方法、管柱设计和压井设备,制定救援井动态压井方案;最后完成钻井、压井等设备优选。

2.3.4 深水水下应急封井装置国产化

水下应急封井装置是目前世界海洋石油工业处理井喷的终极手段,也是一个国家海洋应急装备研制能力的集中体现。水下应急封井装置是集机械制造、液压控制、数据监测、信息传输和水下机器人(ROV)干预等技术于一体的重大海洋井控装备,具有关井、分流、压井、分散剂注入和圈闭气体释放等功能,结构复杂,可靠性要求高。应用流体动力学、海洋环境载荷等分析技术^[55-57],完成了我国首套水下应急封井装置设计、样机制造和工厂测试,在南海深水海域试验成功,填补了我国在深水油气应急装备研制领域的空白,标志着我国海洋石油装备制造水平进入国际先进行列^[58-60]。

2.4 深水油气开采设施安全检测及监测技术

针对南海深水油气开采环境恶劣的情况,研发了新一代数字化、智能化海洋油气开采设施安全及完整性检测、监测技术及装备。

2.4.1 深水油气开采设施泄漏应力波智能监测方法

首先,进行了阀门、管道等简单构件以及防喷器、采油树等复杂设备泄漏应力波监测试验,研究了传感器布设和监测参数设置方法。其次,研究应力波信号处理方法,通过信号去噪和信号重构,提取信号特征,为有效判断深水油气开采设施泄漏提

供了可靠的数据;进一步开展了泄漏状态识别研究,利用深度学习提取良好特征、强大模式的识别功能,实现了泄漏应力波信号的识别。最后,研究了阀门内漏速率的反演模型,建立了管道、防喷器、采油树等设施泄漏的定位方法,研发了深水油气开采设施泄漏应力波监测及智能化预警系统,实现了适应水下环境的油气开采设施泄漏监测、状态识别和事故预警等功能^[61]。

2.4.2 井筒泄漏监测诊断技术及智能系统

针对深水气井油套管泄漏风险高等难题,研究了泄漏检测方法和快速检测技术等系列技术,形成了深水油套管泄漏诊断与预警技术^[62-65]。通过分析泄漏声波产生及其在环空中的传播机制、不同泄漏条件对井口环空声波信号的影响^[62],为井下泄漏状态的声学诊断提供了基础依据。提出了融合泄漏声波信号自相关分析与环空介质变声速求解的井下油套管漏点定位方法,实现了对井下油套管单点和多点泄漏位置的准确判断。建立了磁-声复合的油套管接头密封性检测方法,实现了密封面真实接触状况的超声相控阵成像探测,为在井口快速确定油套管气密封可靠性提供了便捷手段。建立了基于氦气示踪剂检测的漏点量化分析方法,揭示了注入压力、油管流量、泄漏孔径及泄漏位置对返出氦气浓度分布的影响机理,实现了井下油套管漏点大小的地面诊断。

2.4.3 水下结构物缺陷交流电磁场智能可视化检测系统

针对水下结构物缺陷,开展了交流电磁场检测智能识别方法及系统研究,构建了海水环境电磁场检测理论及数值仿真模型,分析了不同类型缺陷周围畸变电磁场的分布规律,重点针对水下结构物缺陷的可视化评估和智能识别分类等关键技术及系统开展了研究,提出了水下结构物缺陷的智能识别与可视化评估方法,研发了水下结构物缺陷电磁场检测智能系统^[66],实现了水下结构物缺陷的智能识别与可视化评估,获取了缺陷形貌丰富和准确的信息,为水下结构智能检测、安全评估及维修决策提供了技术支撑,保障了装备安全服役。

2.4.4 关键结构件疲劳损伤检测技术

隔水管是连接海底井口和钻井平台的关键部件,基于磁记忆检测技术,研制了隔水管主管、边管专用检测装置^[67],并开发了主管、边管检测软件,形成了隔水管检测技术。蓝鲸 1 号、海洋石油 982、981 深水钻井平台先后利用该技术进行了隔水管检

测试验^[68],试验结果充分体现了该检测技术快速、高效的特点。利用该检测技术的可视化分析功能,实现了对隔水管内壁磨损、外擦伤、腐蚀的有效辨识,检测装置表现出良好的性能,其中立式主管内检测装置适用于海洋钻井平台,可以在不影响海洋钻井平台正常作业的情况下,在平台的有限空间内直接对立式/卧式摆放的隔水管进行检测,突破了常规检测手段仅能在基地按照预定周期对分批次运回隔水管进行检测的局限性,可以节省高额的隔水管转运费,并缩短了隔水管检测周期,为深水钻井平台预防隔水管疲劳断裂提供了技术手段。

3 南海深水油气开采风险评估及安全控制技术发展建议

全球深水油气勘探开发热度依然高涨,我国将加大进军深水步伐,未来我国深水油气勘探开发技术需求依然迫切。南海深水油气开采面临超深水、深水高温高压、深水深层和深远海等诸多新的技术挑战,我国在深水油气开采、关键工具装备自主供给、安全应急救援能力等方面差距依然明显^[69-71]。因此,需持续进行科技攻关,开展系列深水油气开采风险评估及安全控制技术攻关,保障南海深水油气安全、高效、自主、可控开发。

3.1 持续追求深水油气开采本质安全

以陵水 25-1 气田为代表的深水高温高压大位移复杂开发井、以白云凹陷为代表的深水深层(埋深大于 5 000 m,储层温度超过 230 ℃)勘探开发、以永乐气田为代表的深水复杂地层高效钻井等复杂深水井、超深水井日趋增多,现有技术尚无法满足开发要求,事故多发,复杂开发井作业经验为零,亟需攻克深水复杂地层钻完井关键技术,持续追求本质安全。

3.2 推进深水油气开采装备及工程软件国产化

目前使用的国外深水钻完井工具及装备价格居高不下,装备采购、到货周期长,敏感区域不提供技术服务,不利于开采工作实时开展,且易遭受国外技术封锁,极大地影响着深水勘探开发,亟需开展深水水下防喷器、隔水管系统、智能完井工具、自动化智能化钻井装备、特殊环境钻井液体体系等关键装备和材料的国产化。此外,目前国内深水钻井设计主要依赖 Landmark 和 Drillbench 等国外公司的软件,国产工程软件不但缺少部分模块,而且有待完善和工程化。国内在钻井工程数据资源管理、分

析、共享和应用方面相比国外严重滞后,亟需推进关键核心工具装备和工程软件的国产化。

3.3 增强深水油气开采风险防控与应急能力

井控应急保障能力是确保深水钻探安全的基础,也是我国石油行业高质量安全发展的“压舱石”。深水作业环境严苛,安全应急挑战异常严峻,需进一步研究井喷事故情景构建、风险预警、应急封堵、灭火救援等关键技术,形成自主全海域、全水深、全工况的井控应急安全保障技术体系,增强风险防控与应急能力,杜绝深水安全环保事故。

3.4 力促智能化保障深水油气开采安全

钻完井是勘探开发一体化的关键环节,构建深水“探井-开发井”一体化钻井设计及井筒安全评估技术体系,可进一步支撑深水勘探开发一体化。智能化技术是深水油气开发控制成本、提高采收率和延长油井寿命的有效手段^[72-73],实现井下监测、测试、控制等功能,发现问题,提前制定措施,达到数字智能化转型、科技保安全和提质增效的目的。

4 结束语

南海深水油气资源是我国能源的主力勘探新区和重要接替区,通过多年的技术攻关与实践,在深水油气开采风险识别及安全控制技术方面取得了长足进步,初步形成了以深水海洋环境风险评估与控制、深水浅层地质灾害预测与控制、深水钻井井控与应急救援、深水油气开采设施安全检测及监测等为核心的南海深水油气开采风险识别及安全控制技术体系,为实现南海深水油气安全、高效、自主、可控开发提供了强有力的技术支撑。随着勘探向超深水、深水高温高压、深水深层、深远海等领域推进,需要明确发展方向,持续攻关和完善本质安全、关键装备、材料和工程软件的国产化、高效风险防控与应急能力、智能诊断与预警等技术,以进一步推动深水油气开采风险评估及安全控制技术的发展与进步。

参 考 文 献

References

- [1] 官柯. 海上油气勘探 60 年 [J]. 石油知识, 2019(6): 20-22.
GONG Ke. 60 years of offshore oil and gas exploration[J]. Petroleum Knowledge, 2019(6): 20-22.
- [2] 高德利, 张广瑞, 王宴滨. 中国海洋深水油气工程技术与装备创新需求预见及风险分析 [J]. 科技导报, 2022, 40(13): 6-16.
GAO Deli, ZHANG Guangrui, WANG Yanbin. Innovation demand foresight and risk analysis of technologies and equipment for deep-water oil & gas engineering in China[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(13): 6-16.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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 deep-water drilling and completion technology in South China Sea[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(1): 8-12.
- [6] 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.
- [7] 谢玉洪. 中国海油近海油气勘探实践与思考 [J]. 中国海上油气, 2020, 32(2): 1-13.
XIE Yuhong. Practices and thoughts of CNOOC offshore oil and gas exploration[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(2): 1-13.
- [8] 谢玉洪, 张功成, 唐武, 等. 南海北部深水油气成藏理论技术创新与勘探重大突破 [J]. 天然气工业, 2020, 40(12): 1-11.
XIE Yuhong, ZHANG Gongcheng, TANG Wu, et al. Theoretical and technological innovation of oil and gas accumulation and major exploration breakthroughs in deep-water areas, northern South China Sea[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(12): 1-11.
- [9] 刘书杰, 吴怡, 谢仁军, 等. 深水深层井钻井关键技术发展与展望 [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]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(2): 139-145.
- [10] 韦红术, 王荣耀, 张玉亭, 等. 南海深水钻井防台风应急技术 [J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(1): 151-153.
WEI Hongshu, WANG Rongyao, ZHANG Yuting, et al. Anti-typhoon emergency technology of deepwater drilling in South China Sea[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(1): 151-153.
- [11] 陈帅, 俞金林, 王靖凯, 等. 孤立内波对动力定位船舶作业的影响和应对措施 [J]. 船舶与海洋工程, 2020, 36(4): 75-78.
CHEN Shuai, YU Jinlin, WANG Jingkai, et al. Risk of solitary internal waves on the operation of dynamic positioning vessel and its countermeasures[J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2020, 36(4): 75-78.
- [12] 胡伟杰, 刘正礼, 陈彬. 南海内波流对深水钻井的影响及对策 [J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(1): 160-162.
HU Weijie, LIU Zhengli, CHEN Bin. Impacts of internal waves in

- the South China Sea on deepwater drilling safety and corresponding countermeasures[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2015, 37(1): 160–162.
- [13] 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 Geological Frontiers*, 2012, 28(1): 51–54.
- [14] 武胜男, 陈茂玉, 樊建春, 等. 中国南海高温高压井钻完井损失工时事件统计分析 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(5): 12–18.
WU Shengnan, CHEN Maoyu, FAN Jianchun, et al. Statistical analysis on loss man-hours events in drilling and completion of HTHP well in South China Sea[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2020, 16(5): 12–18.
- [15] 彭东华, 董绍华, 张行, 等. 冲蚀磨损在油气管道行业的研究进展 [J]. *油气储运*, 2021, 40(7): 730–741.
PENG Donghua, DONG Shaohua, ZHANG Hang, et al. Research progress of erosion wear in oil and gas pipeline industry[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2021, 40(7): 730–741.
- [16] 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.
- [17] 刘正礼, 张浩, 阳文学, 等. 台风作用下锚泊定位半潜式钻井平台动力特性研究 [J]. *石油钻探技术*, 2015, 43(4): 37–42.
LIU Zhengli, ZHANG Hao, YANG Wenxue, et al. The dynamic characteristics of mooring semi-submersible drilling platform in typhoon[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(4): 37–42.
- [18] 王火平, 陈亮, 郭延良, 等. 海洋内孤立波预警监测识别技术及其在流花 16-2 油田群开发中的应用 [J]. *海洋工程*, 2021, 39(2): 162–170.
WANG Huoping, CHEN Liang, GUO Yanliang, et al. Observing, identification and early warning technology of internal solitary wave and its application in Lihua 16-2 oilfield group development project[J]. *The Ocean Engineering*, 2021, 39(2): 162–170.
- [19] 蔡树群, 何建玲, 谢皆烁. 近 10 年来南海孤立内波的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26(7): 703–710.
CAI Shuqun, HE Jianling, XIE Jiesshuo. Recent decadal progress of the study on internal solitons in the South China Sea[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(7): 703–710.
- [20] 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.
- [21] LONG Yang, YANG Jin, YIN Qishuai, et al. Numerical simulation study on the mechanism of releasing ultra-deep water shallow gas by drilling pilot holes[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 221: 111294.
- [22] CAO Bohan, YIN Qishuai, GUO Yingying, et al. Field data analysis and risk assessment of shallow gas hazards based on neural networks during industrial deep-water drilling[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 232: 109079.
- [23] 徐群, 陈国明, 王国栋, 等. 无隔水管海洋钻井技术 [J]. *钻采工艺*, 2011, 34(1): 11–13.
XU Qun, CHEN Guoming, WANG Guodong, et al. Research and application prospect of riserless mud recovery drilling technique[J]. *Drilling & Production Technology*, 2011, 34(1): 11–13.
- [24] 马宝金, 王鄂川, 张贺恩, 等. 深水无隔水管钻井稳定性计算分析 [J]. *石油工程建设*, 2020, 46(增刊 1): 177–184.
MA Baojin, WANG Echuan, ZHANG Heen, et al. Analysis and calculation of drill tool stability in deepwater riserless drilling[J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2020, 46(supplement1): 177–184.
- [25] 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 Jianwei, ZHANG Heen, LI Jing, et al. Design and application of self-feedback dynamic well killing machine for deepwater drilling[J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2020, 46(supplement1): 195–201.
- [26] 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 Xinliang. Research on application technology of dynamic kill drilling[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019.
- [27] 李迅科, 周建良, 李嗣贵, 等. 深水表层钻井动态压井装置的研制与应用试验 [J]. *中国海上油气*, 2013, 25(6): 70–74.
LI Xunke, ZHOU Jianliang, LI Sigui, et al. Development and application test of the dynamic killing unit for deep water top-hole drilling[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2013, 25(6): 70–74.
- [28] 吴彬, 向兴金, 舒福昌, 等. 海洋深水表层动态压井钻井液体系研究 [J]. *石油天然气学报*, 2012, 34(3): 114–117.
WU Bin, XIANG Xingjin, SHU Fuchang, et al. Study on dynamic killing and drilling (DKD) fluids for drilling in deepwater wells[J]. *Journal of Petroleum and Natural Gas*, 2012, 34(3): 114–117.
- [29] 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 Jin, ZHANG Bailing, ZHOU Bo, et al. Geological disaster acoustic wave identification and prediction technology of deepwater shallow gas[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2015, 37(1): 143–146.
- [30] 吴时国, 孙运宝, 王秀娟, 等. 南海北部深水盆地浅水流的地球物理特性及识别 [J]. *地球物理学报*, 2010, 53(7): 1681–1690.
WU Shiguo, SUN Yunbao, WANG Xiujian, et al. Geophysical signature and detection of shallow water flow in the deepwater basin of the northern South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(7): 1681–1690.
- [31] 任韶然, 宫智武, 张亮, 等. 南海北部陆坡浅水流评估及深水钻井防治措施 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(4): 99–106.
REN Shaoran, GONG Zhiwu, ZHANG Liang, et al. Shallow water flow hazard assessment in the northern slope of the South China Sea and control measures during deepwater drilling[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2017, 41(4): 99–106.
- [32] 王磊, 杨进, 李莅临, 等. 深水含水合物地层钻井井口稳定性研究 [J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(12): 2312–2318.
WANG Lei, YANG Jin, LI Lilin, et al. Wellhead stability in gas hydrate formation during deep-water drilling[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(12): 2312–2318.
- [33] 杨进, 严德, 田瑞瑞, 等. 深水喷射下表层套管合理钻头伸出量计

- 算[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(3): 367-370.
- YANG Jin, YAN De, TIAN Ruirui, et al. Bit stick-out calculation for the deepwater conductor jetting technique[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(3): 367-370.
- [34] 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 Jin. Calculation method of surface conductor setting depth in deepwater oil and gas wells[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(11): 1396-1406.
- [35] 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 Bo, YANG Jin, ZHOU Jianliang, 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.
- [36] 刘清友, 秦松, 毛良杰, 等. 深水钻井隔水导管承载能力影响因素分析[J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(5): 49-56.
- LIU Qingyou, QIN Song, MAO Liangjie, et al. An analysis of the factors affecting the load-bearing capacity of deep water drilling conductor[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(5): 49-56.
- [37] 刘书杰, 杨进, 周建良, 等. 深水海底浅层喷射钻进过程中钻压与钻速关系[J]. *石油钻采工艺*, 2011, 33(1): 12-15.
- LIU Shujie, YANG Jin, ZHOU Jianliang, et al. Research on relationship between weight-on-bit and drilling rate during jetting drilling in sub-bottom deepwater[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2011, 33(1): 12-15.
- [38] 汪顺文, 杨进, 严德, 等. 深水表层导管喷射钻进机理研究[J]. *石油天然气学报*, 2012, 34(8): 157-160.
- WANG Shunwen, YANG Jin, YAN De, et al. Research of jetting drilling mechanism of surface conductor in deepwater[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2012, 34(8): 157-160.
- [39] 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 Liwan22-1-1 ultra-deepwater well in east of South China Sea[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(1): 13-19.
- [40] ZHAO Xin, YIN Qishuai, YANG Jin, et al. Risk assessment of surface conductor jetting installation during deep-water drilling in sloping seabed[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266(Part 5): 113057
- [41] 吴涛, 李列, 孙金, 等. 深水陆坡区井场海底稳定性评价: 以南海松涛深水井场为例[J]. *工程地球物理学报*, 2021, 18(6): 828-839.
- WU Tao, LI Lie, SUN Jin, et al. Evaluation of submarine slope stability of drilling site in deepwater continental slope: a case study of Songtao drilling site in the South China Sea[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2021, 18(6): 828-839.
- [42] 欧阳敏, 吴涛, 李列, 等. 琼东南陆坡区复杂地形深水井场海底稳定性评估[J]. *中国海上油气*, 2020, 32(4): 179-189.
- OUYANG Min, WU Tao, LI Lie, et al. Seabed stability evaluation of deep water well site with complex topography in Qiongdongnan continental slope area[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2020, 32(4): 179-189.
- [43] 叶吉华, 刘正礼, 罗俊丰, 等. 南海深水钻井井控技术难点及应对措施[J]. *石油钻采工艺*, 2015, 37(1): 139-142.
- YE Jihua, LIU Zhengli, LUO Junfeng, et al. Technical difficulties and countermeasures in well control of deepwater drilling in the South China Sea[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2015, 37(1): 139-142.
- [44] 叶吉华, 刘正礼, 罗俊丰, 等. 深水钻井井控技术[J]. *科技创新导报*, 2014, 11(28): 46.
- YE Jihua, LIU Zhengli, LUO Junfeng, et al. Deepwater drilling well control technology[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2014, 11(28): 46.
- [45] 刘书杰, 杨向前, 郭华, 等. 井控溢流快速判断方法研究[J]. *煤炭技术*, 2017, 36(5): 296-298.
- LIU Shujie, YANG Xiangqian, GUO Hua, et al. Research for judgment method of well control overflow[J]. *Coal Technology*, 2017, 36(5): 296-298.
- [46] 付建红. 深水钻井溢流监测与井控技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- FU Jianhong. Kick detection and well control technology during deepwater drilling[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [47] YIN Qishuai, YANG Jin, TYAGI M, et al. Field data analysis and risk assessment of gas kick during industrial deepwater drilling process based on supervised learning algorithm[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 146: 312-328.
- [48] YIN Qishuai, YANG Jin, TYAGI M, et al. Machine learning for deepwater drilling: gas-kick-alarm classification using pilot scale rig data with combined surface-riser-downhole monitoring[J]. *SPE Journal*, 2021, 26(4): 1773-1799.
- [49] 殷志明, 张红生, 周建良, 等. 深水钻井井喷事故情景构建及应急能力评估[J]. *石油钻采工艺*, 2015, 37(1): 166-171.
- YIN Zhiming, ZHANG Hongsheng, ZHOU Jianliang, et al. Scenario design of blowout accidents in deepwater drilling and emergency capacity assessment[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2015, 37(1): 166-171.
- [50] 姬辉, 翟晓鹏, 林宝霞, 等. 救援井井眼轨迹设计切入角分析[J]. *断块油气田*, 2016, 23(2): 240-242.
- JI Hui, ZHAI Xiaopeng, LIN Baoxia, et al. Analysis of entrance angle for relief well trajectory design[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2016, 23(2): 240-242.
- [51] 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 Changli, MIAO Dianyuan, LI Yunzhi, 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.
- [52] 张帅. 救援井动态压井参数设计研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- ZHANG Shuai. A study on dynamic kill of relief well[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2019.
- [53] 赵维青, 刘正礼, 宋吉明, 等. 深水救援井动态压井设计方法及应用[J]. *石油钻采工艺*, 2016, 38(2): 186-190.
- ZHAO Weiqing, LIU Zhengli, SONG Jiming, et al. Design method for dynamic well killing of deepwater relief well and its application[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2016, 38(2): 186-190.
- [54] 郝希宁, 王宇, 党博, 等. 救援井电磁探测定位方法及工具研究[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(3): 75-80.
- HAO Xining, WANG Yu, DANG Bo, et al. Research on electromagnetic detection and positioning methods and tools for relief

- wells[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(3): 75–80.
- [55] 董星亮, 张崇, 顾纯巍, 等. 3 000 m 水下应急封井装置下放过程平衡分析 [J]. *中国海上油气*, 2020, 32(5): 114–119.
DONG Xingliang, ZHANG Chong, GU Chunwei, et al. Balance analysis for landing of subsea capping stacks to a depth of 3 000 m[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2020, 32(5): 114–119.
- [56] 朱敬宇, 陈国明, 刘康, 等. 应急封井装置导向下放系统结构动态响应特性研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(8): 194–200.
ZHU Jingyu, CHEN Guoming, LIU Kang, et al. Research on structural dynamic response characteristic of capping stack landed guiding system[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(8): 194–200.
- [57] 王茂刚. 深水水下应急封井装置下放安装技术研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
WANG Maogang. Research on down-installation technology of deep-water subsea capping stack[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2021.
- [58] 王宇, 郝希宁, 李朝玮. 水下应急封井装置概述 [J]. *海洋工程装备与技术*, 2019, 6(2): 504–508.
WANG Yu, HAO Xining, LI Chaowei. Overview of subsea capping stacks[J]. *Ocean Engineering Equipment and Technology*, 2019, 6(2): 504–508.
- [59] 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(supplement1): 181–185.
- [60] 李迅科, 殷志明, 刘健, 等. 深水钻井井喷失控水下应急封井回收系统 [J]. *海洋工程装备与技术*, 2014, 1(1): 25–29.
LI Xunke, YIN Zhiming, LIU Jian, et al. Marine well containment system for subsea blowout scenario of deepwater drilling[J]. *Ocean Engineering Equipment and Technology*, 2014, 1(1): 25–29.
- [61] XU Changhang, ZHANG Wuyang, WU Changwei, et al. An improved method of eddy current pulsed thermography to detect subsurface defects in glass fiber reinforced polymer composites[J]. *Composite Structures*, 2020, 242: 112145.
- [62] 王朝晖, 张来斌, 辛若家, 等. 声发射技术在管道泄漏检测中的应用 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2007, 31(5): 87–90.
WANG Zhaohui, ZHANG Laibin, XIN Ruojia, et al. Application of acoustic emission technique in pipeline leakage detection[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2007, 31(5): 87–90.
- [63] 李皋, 李泽, 简旭, 等. 页岩膨胀应变及固井质量对套管变形的影响研究 [J]. *特种油气藏*, 2021, 28(3): 139–143.
LI Gao, LI Ze, JIAN Xu, et al. Study on the effect of shale expansion strain and cementing quality on casing deformation[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(3): 139–143.
- [64] 储胜利, 张来斌, 樊建春, 等. 基于磨屑收集的套管磨损监测技术 [J]. *天然气工业*, 2008, 28(8): 70–72.
CHU Shengli, ZHANG Laibin, FANG Jianchun, et al. Research on monitoring technology for casing wear[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(8): 70–72.
- [65] 秦先勇, 张来斌, 王朝晖, 等. 基于过程信息融合的管线泄漏诊断 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(4): 82–86.
QIN Xianyong, ZHANG Laibin, WANG Zhaohui, et al. Pipeline leak detection based on process information fusion[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2008, 32(4): 82–86.
- [66] ZHAO Jianming, LI Wei, ZHAO Jianchao, et al. A novel ACFM probe with flexible sensor array for pipe cracks inspection[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 26904–26910.
- [67] ZHOU Wei, FAN Jianchun, NI Jinlu, et al. Variation of magnetic memory signals in fatigue crack initiation and propagation behavior[J]. *Metals*, 2019, 9(1):89.
- [68] 周威, 樊建春, 刘书杰, 等. 隔水管焊缝疲劳损伤检测试验研究 [J]. *石油机械*, 2020, 48(1): 70–76.
ZHOU Wei, FAN Jianchun, LIU Shujie, et al. Experimental study on fatigue damage detection of drilling riser weld[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(1): 70–76.
- [69] 董星亮. 深水钻井重大事故防控技术研究进展与展望 [J]. *中国海上油气*, 2018, 30(2): 112–119.
DONG Xingliang. Research progress and prospect for serious accident prevention and control technology of deep water drilling[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018, 30(2): 112–119.
- [70] 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 Deli, WANG Yanbin. Some research progress in deepwater drilling mechanics and control technology[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(supplement 2): 102–115.
- [71] 马洪刚, 张来斌, 樊建春. 作业条件危险性评价法在深水钻完井作业评价中的应用研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2011, 7(9): 89–92.
MA Honggang, ZHANG Laibin, FAN Jianchun. Study on the application of LEC to the risk assessment of deep-water drilling and completion operations[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2011, 7(9): 89–92.
- [72] 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]. *石油钻探技术*, 2022, 50(2): 1–8.
LI Zhong. Progress and prospects of digitization and intelligentization of CNOOC's oil and gas well engineering[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(2): 1–8.
- [73] 殷志明, 刘书杰, 谭扬, 等. 基于机器学习的深水钻井大数据处理方法研究 [J]. *海洋工程装备与技术*, 2019, 6(增刊 1): 446–453.
YIN Zhiming, LIU Shujie, TAN Yang, et al. Research on outlier marking method of deepwater drilling big data in machine learning[J]. *Ocean Engineering Equipment and Technology*, 2019, 6(supplement1): 446–453.