



中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊
全国中文核心期刊
美国《化学文摘》(CA) 收录期刊
俄罗斯《文摘杂志》(AJ) 收录期刊
EBSCO学术数据库收录期刊 (美)
AAPG协会期刊出版平台收录期刊 (美)
中国科技论文统计源期刊
RCCSE中国核心学术期刊

中国海油“深海一号”大气田钻完井关键技术进展及展望

李中

Progress and Prospect of Key Technologies for Drilling and Completion of “Deep Sea No.1” Gas Field of CNOOC

LI Zhong

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023031>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国石化海外油气田钻井完井技术现状与发展建议

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

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

杨税务潜山油气藏大位移井钻井完井关键技术

Drilling and Completion Technologies of Extended-Reach Wells in the Yangshuiwu Buried Hill Reservoir

石油钻探技术. 2021, 49(2): 14–19 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021010>

南堡2号构造深层潜山水平井钻井完井技术

Drilling and Completion Techniques for Horizontal Wells in the Deep Buried Hills of the Nanpu No.2 Structure

石油钻探技术. 2018, 46(2): 10–16 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018045>

胜利油田钻井完井技术新进展及发展建议

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

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

深水救援井井眼轨道设计探讨

Discussion on the Design of Well Trajectories in Deepwater Relief Wells

石油钻探技术. 2017, 45(1): 21–26 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201701004>

中国石化重点探区钻井完井技术新进展与发展建议

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

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



扫码关注公众号，获取更多信息！

doi:10.11911/syztjs.2023031

引用格式：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.

中国海油“深海一号”大气田钻完井 关键技术进展及展望

李 中

(中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

摘要：“深海一号”是我国首个自营深水大气田，海况复杂，气藏分散，其二期工程更是面临高温高压地质环境，钻完井技术与成本挑战巨大。为解决上述问题，研究了多维水下井口优选、多因素探井转开发井评价、深水大位移井安全钻井周期预测和深水气井智能完井等钻完井设计关键技术；研发了深水水下井口、深水水下采油树、深水早期溢流监测装置和多流道旁通筛管等工具装备，并成功投用；发展了深水开发井大规模表层批钻及井间移位、极端海况深水钻井平台-隔水管作业安全保障、非目的层段高效钻井提速、深水开发井上下部完井一体化等高效作业技术，有效支撑了“深海一号”大气田及其二期工程的安全高效钻完井作业。在总结上述钻完井关键技术进展的基础上，展望了未来我国深水钻完井技术发展方向，对未来深远海复杂油气田开发具有一定指导作用。

关键词：深水钻井；完井；一体化作业；技术进展；深海一号；中国海油

中图分类号：TE52 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-0890(2023)04-0088-07

Progress and Prospect of Key Technologies for Drilling and Completion of “Deep Sea No.1” Gas Field of CNOOC

LI Zhong

(CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing, 100028, China)

Abstract: “Deepwater No.1” is the first self-operated deepwater gas field in China, with scattered gas reservoirs and complex sea conditions. Its Phase 2 was confronted with high-temperature and high-pressure (HTHP) geological environments, extensive challenges of drilling and completion technologies and high cost for gas field development. To solve the above problems, the key technologies for drilling and completion design were studied and developed, such as the multi-dimensional optimization of underwater wellhead, multi-factor development well conversion evaluation of exploratory wells, safety drilling duration prediction of extended reach wells in deepwater, and intelligent completion of deepwater gas wells. A series of China made tools and equipment were developed and successfully employed, such as deepwater underwater wellheads, deepwater underwater Christmas trees, deepwater early overflow detection devices, and multi-channel bypass screens. Furthermore, for deepwater development wells, efficient operation technologies were developed, such as large-scale surface batch drilling and inter-well move, safety assurance of the deepwater drilling platform-riser operations in extreme sea conditions. Further, emphasis was placed on the efficient penetration rate improvement in non-target intervals, and integrated completion of upper and lower section of deepwater development wells. The above technologies have effectively contributed to the safe and efficient drilling and completion of “Deep Sea No.1” as well as its second phase. After a review of the advancements of these

收稿日期：2022-12-28；改回日期：2023-02-07。

作者简介：李中（1972—），男，河南驻马店人，1994年毕业于江汉石油学院钻井工程专业，2011年获中国石油大学（北京）安全技术及工程专业博士学位，正高级工程师，博士研究生导师，主要从事海洋油气钻完井方面的研究与技术管理工作。系本刊编委会副主任。E-mail: lizhong@cnooc.com.cn。

基金项目：国家自然科学基金项目“深海钻井溢漏同存复杂地层-井筒压力耦合机理及智能联动调控机制”（编号：52274026）、中国海洋石油集团有限公司重大科技项目“深水/超深水复杂井安全高效钻完井关键技术”（编号：KJGG2022-0201）联合资助。

key technologies, further research direction of deepwater drilling and completion technologies in China is prospected, which is meaningful to guide the development of deep offshore complex oil and gas fields in future.

Key words: deepwater drilling; completion; integrated operation; technical progress; Deep Sea No.1; CNOOC

目前,全球深水油气累计产量为 96×10^8 t油当量,剩余深水可采储量为 329×10^8 t油当量,海洋油气开采已进入黄金时代。我国南海油气资源总量超过 300×10^8 t,2014年勘探发现的“深海一号”大气田储量超千亿方^[1-3],其一期工程已于2021年投产,年产气量达 30×10^8 m³,二期工程于2022年全面开工建设,预计投产后气田总产能达到 45×10^8 m³/年。该气田发育在琼东南盆地底部中央峡谷内的浊积水道复合体,为条带状展布的孤立砂体,7个井区各自独立成藏,水深1 252~1 547 m,东西南北跨度分别为30 km×50 km。所在海域海况恶劣,工程地质环境复杂,钻完井难度巨大,经济开发门槛高,面临的难题具体表现为2方面:

1)以“深海一号”一期为代表的超深水气田,水深最深达1 500 m以上,但储层埋藏浅,地层承压能力低,最低破裂压力系数仅1.21。海床温度仅2~4 °C,钻井液流变性控制和浅层固井质量面临巨大挑战^[4-6]。高度分散的大气田,如何优选总体布局降低开发成本,以及在满足井筒完整性等要求的前提下,如何合理利用探井、有效防砂控水等均面临挑战。

2)以“深海一号”二期为代表的深水高压气田,水深约950 m,但地层温压系统复杂,最高地层

压力69 MPa且存在压力曲线反转,最高地层温度138 °C。探井作业中井漏、溢流、阻卡等复杂情况频发,极端复杂地质环境下存在“溢漏同层”现象,严重制约深水深层油气的勘探开发进程^[7-8]。

围绕上述钻完井难题,中国海油立足自主科技攻关,依托国家自然科学基金、国家科技重大专项等科研课题,建立了深水钻完井关键技术体系。研究成果全面付诸工程实践,设计方案与实际作业吻合度95%以上,源头提质降本效果显著,支撑建成了我国首个自营超深水大气田——“深海一号”大气田,2021年该气田的全面投产标志着我国海洋石油工业全面进入“超深水时代”^[9-10]。基于此,总结了中国海油“深海一号”大气田钻完井关键技术进展,并进行了技术展望,以期为未来挺进深远海开发复杂油田提供技术支撑。

1 深水钻完井关键技术体系

深水钻完井关键技术体系集钻完井设计关键技术、深水钻完井关键工具装备、高效作业及综合提速技术于一体,如图1所示。其中,钻完井设计关键技术及高效作业及综合提速技术各有4项代表技

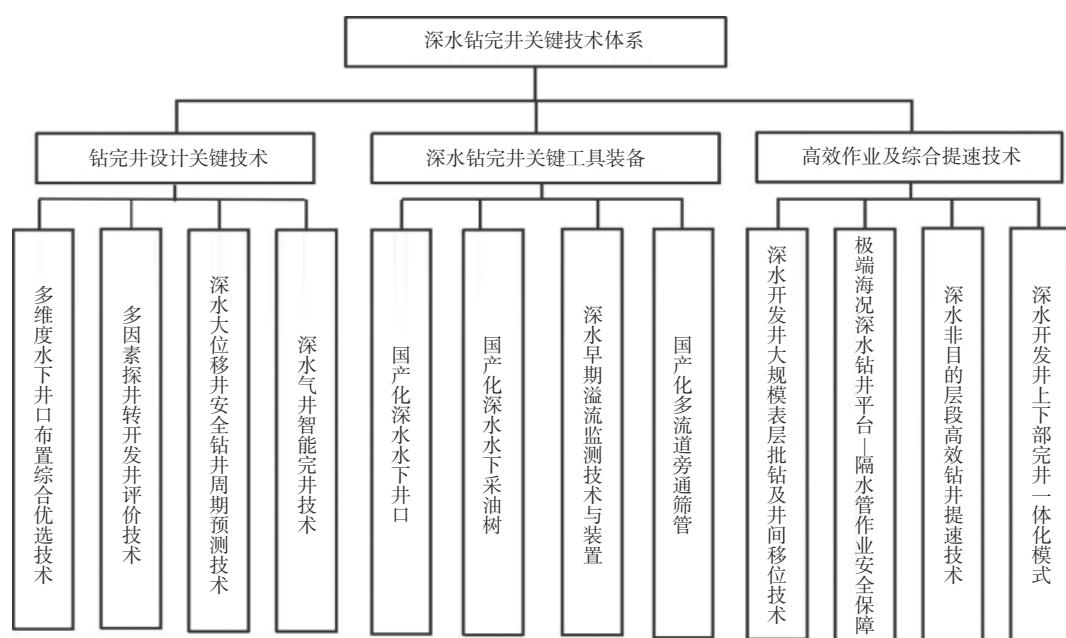


图1 深水钻完井关键技术体系

Fig.1 Key technology system of deepwater drilling and completion

术,深水钻完井关键工具装备有4项代表性成果。

2 钻完井设计关键技术

2.1 国产化深水水下井口

水下井口钻井中心数量及位置直接影响投资规模,因此针对“深海一号”大气田东西跨度50 km、南北跨度30 km、水深落差300 m的复杂空间分布形态(如图2所示),对7个井区分别进行了个性化设计。首创了以成本最小化为目标函数的水下井口布置综合评估技术,综合考虑油藏井位部署、钻完井实现技术难度、工程设施布局、作业风险量化等多维度因素,形成了深水水下井口布置综合评估流程及推荐做法,建立了多维度评估图版;确立了“深海一号”大气田“独立井口+集中式井口”和“大串联+小集中”结合的水下井口总体布局,与传统单一模式相比节省成本上亿元。

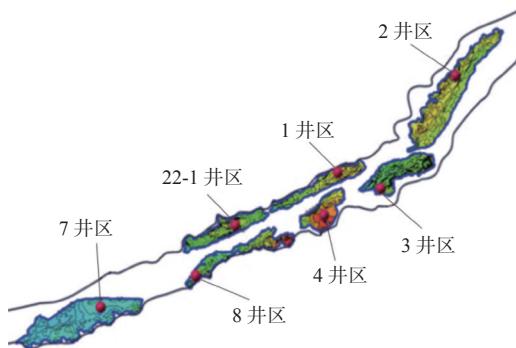


图2 “深海一号”大气田井区分布情况

Fig.2 Well map of "Deep Sea No.1" gas field

2.2 国产化深水水下采油树

探井转开发井有望大幅降低深水气田的开发成本,单井降本规模达上亿元。其中,油气井的井筒完整性、产量剖面、流体组分等因素,是探井能否转为合格生产井的关键,在探井设计阶段难以全面考虑上述因素能否满足安全性要求^[11-13]。为此,以井筒完整性为目标,建立了深水探井转开发井可行性评价技术,该技术以满足油藏要求、井口情况、固井质量等3个定性因素和套管材质、环空压力、井筒尺寸、综合成本等4个定量因素为控制目标^[14],在“深海一号”大气田优选2口探井转为开发井,降本效果显著。

2.3 深水大位移井安全钻井周期预测技术

基于深水深部高压地层弹性参数和力学特征,根据岩石长期强度实验规律,建立了深水大位移井

安全钻井周期预测方法,修正了传统力-化耦合模型中的误差,围绕地应力笛卡尔坐标系进行柱坐标转换,建立了定向井坍塌压力随井眼钻开时间的变化规律(如图3所示),准确预测了大位移井长裸眼段的安全钻井周期,支撑深水开发井的水平位移延伸长度达到3 000 m,为井身结构减次、优化套管下深等奠定了理论基础。同时,开发了深水高压井钻进井筒压力实时监控软件系统,从设计与作业双重角度,解决了深水复杂地层的安全钻井问题。

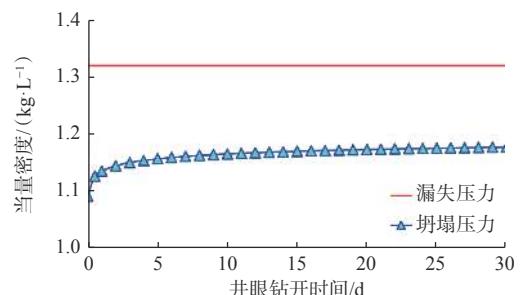


图3 深水开发井坍塌压力随井眼钻开时间的变化规律

Fig.3 Variation of collapse pressure with hole drilling time in deepwater development well

2.4 深水气井智能完井技术

“深海一号”大气田底水发育,能量充足,未来气井生产过程中存在见水风险,控水难度大。为满足边底水气田生产管理及后期生产调整的需求,创新设计了深水智能完井技术方案(如图4所示):对比液控与电控2种滑套控制方式,从技术可靠性角度出发,推荐使用3条液控管线控制2个滑套的方案;由于“深海一号”气田为砾石充填防砂,无需将控制阀安装在产层段,因此推荐使用带环空外套的井下流量控制阀布置形式。该技术方案实现了双层井下流量监测和调整,同时满足了底水气藏的智能控制。

深水智能完井技术方案在满足技术可行性的基础上,兼顾了深水作业流程造成的储层保护和井控安全,考虑了后期施工作业风险、生产后期起管柱时效,减少了FIV的开启风险等,最终形成了满足深水完井工艺整个生命周期可靠性的智能完井技术。

3 深水钻完井关键工具装备

3.1 国产化深水水下井口

目前国际主流深水水下井口性能为:额定工作压力69~103 MPa,额定温度U级(-18~121 °C),

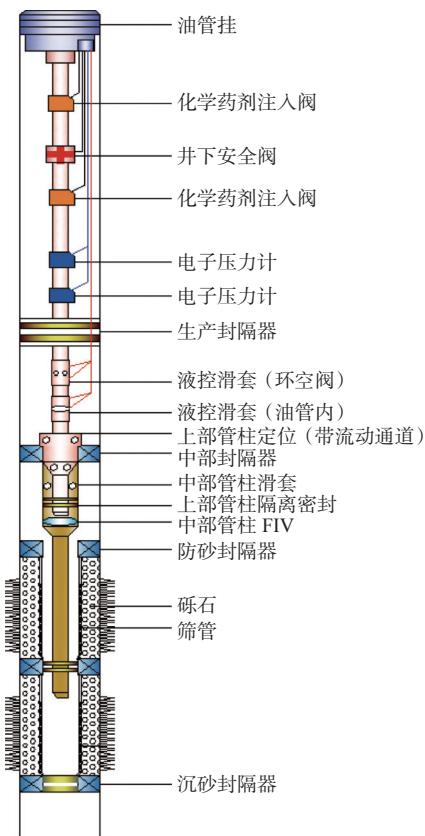


图 4 “深海一号”智能完井管柱设计结果

Fig.4 Design of intelligent completion string in "Deep Sea No.1" gas field

材料等级 DD—HH, 产品规范等级 PSL-3 或 PSL-3G; 针对不同深水环境, 各厂商也推出了各自针对性的井口设计, 如 GE 公司的高温高压井口 MS700、FMC 公司的 138 MPa 高压井口和 FMC 公司的小尺寸套管用水下井口等^[15]。

中国海油依托工信部创新专项, 研制了深水水下井口系统及配套工具。其中, 高压井口额定工作压力 103 MPa, 额定温度 U-18~121 °C, 材料等级 HH 级, 产品规范等级 PSL-3。通过了功能测试、压力循环试验、温度循环测试和总装测试等各项检验, 并完成了海试。海试环节包括: 钻一开次井眼, 下表层导管及井口头; 钻二开次井眼, 下表层套管, 进行 BOP 试压, 回收抗磨补心; 送入 φ339.7 mm 套挂密封总成、φ339.7 mm 抗磨补心及其试压杯, 送入 φ244.5 mm 套管挂密封总成, 进行试压、固井循环作业、固井胶塞测试, 以及回收密封总成等。

深水水下井口国产化研究取得突破, 将会改变我国在深水水下井口依赖于国外公司的现状, 保障我国深水钻井作业自主控制和安全实施, 提升在复杂国际形势下我国能源领域的抗风险能力。

3.2 国产化深水水下采油树

水下采油树技术一直被 TechnipFMC、OneSubsea、Baker Hughes 和 Aker Solutions 等 4 家欧美公司所垄断, 这 4 家公司占据国际水下采油树市场的 90%, 导致设备采办周期长、价格高、维修保养难, 长期制约着我国海洋石油自主迈向深水的步伐。

中国海油依托工信部创新专项, 牵头整合国内百余家公司产业链, 研制出我国首台套 500 m 级国产化深水水下采油树, 质量 55 t, 设计寿命 20 年, 额定工作压力 69 MPa, 额定温度 -18~121 °C, 突破了高压密封、防腐、精密加工、深水湿式电气连接等一系列技术瓶颈, 已取得权威第三方认证。目前该装备已在莺歌海海域的东方 1-1 气田成功投用, 标志着我国已具备深水水下采油树整体研发、制造、测试和应用的核心技术能力。

3.3 深水早期溢流监测技术与装置

针对深水油气田开发环境的特点和地质条件的复杂性, 充分利用深水防喷器与隔水管段的安全屏障, 研发了深水水下隔水管气侵早期监测预警系统, 创新引入水声通讯无线传输系统, 实现了该预警系统的安全高效安装与操控。将深水井溢流侵入井筒的流体控制在水下防喷器以下, 实现早发现、早报告、早管控, 有效防止井喷、平台着火、爆炸等重大事故^[16-17]。

深水水下隔水管气侵早期监测预警系统适用最大钻井液密度达到 1.6 kg/L, 全套设备可离线快速安装, 不占井口作业时间, 采用了深水环境水声信号抗噪及容错技术和基于值更模块的自适应电源管理机制, 实现了水下气侵监测仪与水上监测主机的双向通讯, 数据传输速度 ≥500 bit/s, 误码率小于 1%, 累计数据传输运行时长 ≥300 min。该系统数据储存温度满足 -18~82 °C, 工作温度满足 0~60 °C, 水下工作 60 d, 已分别在超深水探井和“深海一号”气田开发项目中成功应用。

3.4 国产化多流道旁通筛管

常规砾石充填过程中, 砾石从携砂液中脱出并自然沉积。深水油气田或长水平井段砾石充填时极易发生早期砂桥现象, 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, 极大地影响了防砂效果^[18]。中国海油结合深水油气田的特点及需求, 研制了国产化多流道旁通筛管, 形成了完善的多流道旁通筛管砾石充填技术, 可通过旁通充填功能确保充填效率, 提高防砂效果和可靠性。具体而言: 1) 设计的多流道旁通筛管外围旁通管圆腰“月

牙形”结构、连接接头快速连接等结构，突破了国际上同类产品的结构形式，确保了筛管过滤精度、强度及充填效果，便于现场操作及下入；2)形成了国内首套多流道旁通筛管检测方式与检测标准，研制了可视化多流道旁通筛管充填试验模拟设备，验证了多流道旁通筛管的可行性和可靠性；3)结合常规砾石充填技术及深水完井特点，研究完善了多流道旁通筛管砾石充填技术配套工艺和工具，并成功在南海深水区块进行了应用，得出了国内首套多流道旁通筛管样品及首项多流道旁通筛管砾石充填技术，填补了国内技术空白。

4 高效作业及综合提速技术

4.1 深水开发井大规模表层批钻及井间移位技术

表层批钻技术是深水钻井提效提速的常规技术之一，但以往的应用规模仅局限于2~3口探井，工期节省幅度有限。针对“深海一号”气田空间范围广、水深跨度大、气藏分散的特点，以效益最大化为目标函数，综合考虑各潜在钻井平台的作业能力，根据定向井与水平井2类井型的施工工艺的差异，制定大规模表层批钻方案，集中批量化完成表层喷射和一开钻井作业。同时，针对不同井段的钻井特点及南海的复杂环境条件，创新设计了分井段-分时段最佳井间移位路径方案，施工工艺如图5所示。“深海一号”大气田开发过程中，首次实现了10口井以上的大规模深水表层批钻技术应用^[3]，大幅压缩了深水钻井作业工期。

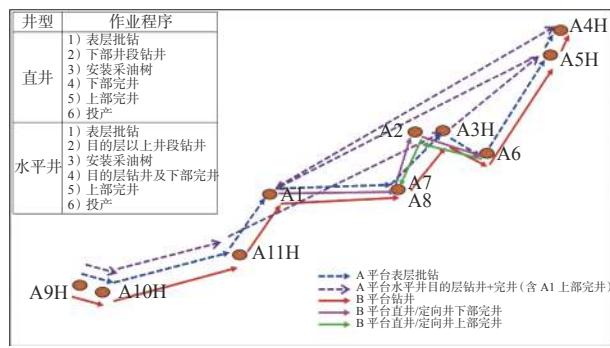


图5 分井段-分时段最佳井间移位路径方案

Fig.5 Optimal inter-well displacement path scheme by well section and time period

深水开发井大规模表层批钻及井间移位技术相对传统技术方式节约井间移位及动复员工期45 d，创造了110 d不起防喷器的世界纪录。

4.2 极端海况深水钻井平台-隔水管作业安全保障

南海台风多发，严重影响深水钻井隔水管系统的安全性和深水钻井作业的时效。例如，对于水深2 500 m的深水井，全部隔水管逐根回收再回接所需总时间为8 d。针对南海极端海况条件，通过以下3方面技术攻关，形成了极端海况下的深水钻井平台-隔水管作业安全保障技术：1)首创了“钻井平台-隔水管-水下井口”耦合模型，揭示了极端海况下的钻井平台-隔水管耦合响应机理；2)系统开发了应对极端海况的深水建井安全控制技术，包括应对内波的隔水管监测预警和应急解脱技术，应对平台限位失效后漂移的安全控制技术等；3)研制了全球首套“主动控制-被动补偿”悬挂隔水管防台装置，通过ABS认证，使平台悬挂隔水管应急适用海况从一年一遇提升到百年一遇，航速由0.3节提高至1.0节。

深水钻井平台-隔水管作业安全保障技术大幅缓解了南海频繁发生的台风、内波等极端海况对钻井隔水管系统带来的巨大风险，将恶劣海况和紧急情况下的平台应急动复员时间压缩至8 h以内。与国际上使用的逐根回收全部隔水管后撤离相比，单口井即可缩短工期4 d以上。

4.3 深水非目的层段高效钻井提速技术

深水开发井钻遇地层95%为非目的层段，因此非目的层钻井提速是重中之重。为此，以实现钻井作业安全、钻井提速和作业效率最大化为目标，从创新方案设计、优选流体体系和优化作业工艺等方面入手，开展重点攻关。首先，基于非目的层段井壁稳定性分析，综合优化井身结构设计方案，在确保安全的前提下尽量减少开次。其次，研发和应用井壁强化钻井液体系，提高地层承压能力，克服深水钻井液易漏失难题；研发和应用“表层首浆低水化热+尾浆低温早强体系”升级表层固井水泥浆性能，后续井段及目的层井段固井，采用防漏、防气窜体系，保障水泥环完整性。最后，通过优选钻头和提速工具，合理设计深水钻井作业参数，确保非储层段钻井提速效果和作业安全，实现非储层段安全高效钻井^[19-20]。

应用非目的层段高效钻井系列技术，极大地提高了“深海一号”大气田开发井建井时效和钻井效率，平均建井时效90%以上，与同等难度下国外公司的设计工期相比，9口新钻井非目的层段作业工期缩短41 d。

4.4 深水开发井上下部完井一体化模式

针对国际通用的完井程序“下部完井—下桥塞临时弃井—转至下口井—井筒重入—上部完井—清喷作业”易受平台空间局限和关键装备交货周期长的影响,创新发展了深水开发井上下部完井一体化作业模式,形成了紧凑空间内完井装备快速安装技术、一体化远程智能监测及控制技术、作业机具适应性升级技术^[21]。其中包括:选择第七代深水钻井平台进行深水完井适应性改造,通过紧凑空间内完井装备快速安装技术,进行大型完井和地面清喷流程设备模块化升级,使完井期间地面防砂设备实现模块化,使设备占用平台甲板面积最小,提升了现场完井作业时效,同时利用一体化远程智能监测及控制技术,保障作业过程安全高效。

通过应用深水开发井上下部完井一体化模式,“深海一号”大气田完井过程中节省场地面积超过40%,无需临时弃井和重入,降低了完井作业风险,缩短工期50 d,实现完井立即清喷,大幅缩减了储层浸泡时间。

5 深水钻完井技术展望

“深海一号”大气田的成功开发及二期工程的全面开钻,标志着我国已掌握1 500 m水深常规温压/高压气田的勘探开发钻完井自主设计和作业能力,关键技术及研究模式已在陵水18-1、宝岛21-1、永乐8-1/3等开发项目中设计应用,为未来深水深层复杂油气田的接续建设提供有力实践支撑。同时,需要清醒地认识到,与国际先进水平相比,我国尚存在一定差距^[22-23]。例如,国际上探井最大作业水深为3 400 m,开发井最大作业水深2 900 m,且已实现超深水高温高压油气开发、复杂大位移水平井和深水巨厚盐层下油气开发,而国产化深水钻完井核心工具装备的关键零部件仍依赖进口,国产化率有待提高。

面向未来,随着南海深水油气勘探开发逐步迈向中深层,技术发展展望如下:

1)随着深水常温常压钻完井技术取得突破,未来(超)深水复杂温压油气田会成为勘探热点,与之相关的技术包括深水精细控压钻井技术体系及装备、具备优质储保效果的深水钻井液及完井液体系、超深水浅层极窄压力窗口钻井技术,以及深水超大位移井和高温高压钻完井技术等。

2)关键核心装备的国产化是未来实现海洋科技

高水平自立自强的重点,包括深水钻井防喷器、隔水管系统、动力定位控制系统、1 500 m级深水水下井口、采油树及配套安装工具等关键核心装备的研制,特别是部分高端零部件和元器件的研发。

3)我国南海深远海及海外深水区块资源勘探开发潜力巨大,未来井控应急技术能力建设至关重要,包括超深水高温高压钻完井井控应急技术、深水盐下钻完井井控应急技术、国际井控资源合作和技术装备研发等。

6 结束语

中国海油肩负国家能源安全使命,立足守正创新战略,成功突破了“深海一号”大气田钻完井技术体系,研究了一系列钻完井设计关键技术,研发了一批关键工具装备,形成了深水气田高效作业和综合提速技术,较大程度上打破了国外技术垄断,实现了从深水自主勘探到自主开发的里程碑式跨越,成为建设海洋强国、维护国家海洋权益的中流砥柱。未来,中国海油将积极打造原创技术策源地,勇当现代产业链链长,持续在深海油气勘探开发、高端装备制造等领域发挥自身优势,持续加强科技创新,加快进军深海步伐,为建设世界一流能源企业而不懈奋斗。

参 考 文 献

References

- [1] 谢玉洪.南海北部自营深水天然气勘探重大突破及其启示[J].*天然气工业*,2014,34(10):1-8.
XIE Yuhong. A major breakthrough in deepwater natural gas exploration in a self-run oil/gas field in the northern South China Sea and its enlightenment[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(10): 1-8.
- [2] 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.
- [3] 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 Renjun, LI Zhong, LIU Shujie, 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.
- [4] 高永德,孙殿强,陈鸣,等.陵水17-2深水气田黄流组重力流沉积特征及模式[J].*中国海上油气*,2018,30(1):22-30.
GAO Yongde, SUN Dianqiang, CHEN Ming, et al. Gravity flow sedimentary characteristics and patterns of Huangliu Formation in LS17-2 deep water gas field[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018,

- 30(1): 22–30.
- [5] 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(supplement2): 168–173.
- [6] 朱海山, 李达, 魏澈, 等. 南海陵水 17-2 深水气田开发工程方案研究 [J]. 中国海上油气, 2018, 30(4): 170–177.
ZHU Haishan, LI Da, WEI Che, et al. Research on LS17-2 deep water gas field development engineering scenario in South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(4): 170–177.
- [7] YUAN Junliang, ZHOU Jianliang, LIU Shujie, et al. An improved fracability-evaluation method for shale reservoirs based on new fracture toughness-prediction models[J]. SPE Journal, 2017, 22(5): 1704–1713.
- [8] 张功成, 米立军, 屈红军, 等. 中国海域深水区油气地质 [J]. 石油学报, 2013, 34(增刊2): 1–14.
ZHANG Gongcheng, MI Lijun, QU Hongjun, et al. Petroleum geo-logy of deep-water areas in offshore China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(supplement2): 1–14.
- [9] 中海油研究总院有限责任公司. 陵水 17-2 气田开发可行性研究报告 [R]. 北京: 中海油研究总院有限责任公司, 2016.
CNOOC Research Institute Limited. Feasibility study report of LS17-2 Gas Field[R]. Beijing: CNOOC Research Institute Limited, 2016.
- [10] 中海油研究总院有限责任公司. 陵水 17-2 气田总体开发方案研究报告 [R]. 北京: 中海油研究总院有限责任公司, 2018.
CNOOC Research Institute Limited. ODP report of LS17-2 Gas Field[R]. Beijing: CNOOC Research Institute Limited, 2018.
- [11] 董星亮, 刘书杰, 谢仁军, 等. 套管封固段变形对高温高压井环空圈闭压力影响规律 [J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(6): 782–786.
DONG Xingliang, LIU Shujie, XIE Renjun, et al. Casing deformation of cemented portions effect on the annular pressure buildup for HTHP gas wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(6): 782–786.
- [12] 吴时国, 谢杨冰, 秦芹, 等. 深水油气浅层钻井的“三浅” 地质灾害 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9): 38–42.
WU Shiguo, XIE Yangbing, QIN Qin, et al. Shallow drilling geological disasters of oil and gas in deepwater[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9): 38–42.
- [13] 杨进, 唐海雄, 刘正礼, 等. 深水油气井套管环空压力预测模型 [J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 616–619.
YANG Jin, TANG Haixiong, LIU Zhengli, et al. Prediction model of casing annulus pressure for deepwater well drilling and completion operation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 616–619.
- [14] 谢仁军, 张伟国, 徐国贤, 等. 温度效应及环空条件对井口抬升影响规律研究 [J]. 石油机械, 2020, 48(2): 72–79.
XIE Renjun, ZHANG Weiguo, XU Guoxian, et al. Influence rules of temperature effect and annular conditions on wellhead uplift[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(2): 72–79.
- [15] 杨进, 曹式敬. 深水石油钻井技术现状及发展趋势 [J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(2): 10–13.
YANG Jin, CAO Shijing. Current situation and developing trend of petroleum drilling technologies in deep water[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(2): 10–13.
- [16] 谢仁军, 刘书杰, 文敏, 等. 深水钻井溢流井控期间水合物生成主控因素 [J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(1): 64–67.
XIE Renjun, LIU Shujie, WEN Min, et al. Main control factor of hydrate generation during overflow well control period of deepwater drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(1): 64–67.
- [17] 袁俊亮, 范白涛, 幸雪松, 等. 基于朴素贝叶斯算法的钻井溢流实时预警研究 [J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(4): 455–460.
YUAN Junliang, FAN Baitao, XING Xuesong, et al. Real-time early warning of drilling overflow based on naive Bayes algorithm[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(4): 455–460.
- [18] 靳祖文, 孙巧雷, 张崇, 等. 深水测试地面流程节流油嘴段温压场研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(5): 19–25.
JIN Zuwen, SUN Qiaolei, ZHANG Chong, et al. Study on temperature-pressure field of throttle nozzle section in deepwater test ground process[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(5): 19–25.
- [19] 孟文波, 张崇, 任冠龙, 等. 陵水 17-2 气田完井液与储层保护技术研究 [J]. 化学与生物工程, 2020, 37(8): 45–47.
MENG Wenbo, ZHANG Chong, REN Guanlong, et al. Completion fluid and reservoir protection technology used in LS17-2 Gas Field[J]. Chemistry & Bioengineering, 2020, 37(8): 45–47.
- [20] 唐咸弟, 李中, 郭永宾, 等. 陵水 17-2 气田深水钻井液性能控制指标体系研究 [J]. 化学与生物工程, 2019, 36(12): 44–47.
TANG Xiandi, LI Zhong, GUO Yongbin, et al. Performance control index system of deepwater drilling fluid in Lingshui 17-2 Gas Field[J]. Chemistry & Bioengineering, 2019, 36(12): 44–47.
- [21] YANG Jin, LIU Shujie, WANG Huanhuan, et al. A novel method for fracture pressure prediction in shallow formation during deepwater drilling[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2022, 144(3): 033005.
- [22] 李清平. 我国海洋深水油气开发面临的挑战 [J]. 中国海上油气, 2006, 18(2): 130–133.
LI Qingping. The situation and challenges for deepwater oil and gas exploration and exploitation in China[J]. China Offshore Oil and Gas, 2006, 18(2): 130–133.
- [23] 李中. 中国海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.