

深井超深井钻完井技术现状、挑战和“十三五”发展方向

汪海阁 葛云华 石林

中国石油集团钻井工程技术研究院

摘 要 “十二五”期间,为解决塔里木、四川等盆地超深油气藏勘探开发所遇到的深井超深井钻完井难题,中石油研制了一批具有自主知识产权的重大装备、工具、仪器、工作液等,包括:① 8 000 m 钻机、四单根立柱超深井钻机、5 000/7 000 m 钻杆管柱自动化处理装置、精细控压钻井技术与装备、双燃料/高可靠性钻机动力机组、气体/欠平衡钻井装备等 6 项深井超深井核心装备;② 自动垂直钻井工具、涡轮钻具、高效 PDC 钻头、系列复合钻头、水力脉冲提速工具、钻井井下安全监控系统、顶驱下套管装置等 7 项核心工具;③ 高温高密度水基钻井液、油基钻井液、高温大温差固井水泥浆、韧性水泥浆体系等 4 项钻井液和水泥浆体系。研究认为,“十三五”期间深井超深井钻完井所面临的挑战包括:深井超深井高温、高压、窄密度窗口、井筒完整性等,以及降本增效的巨大压力,亟待深井超深井高效运移钻机、高效破岩钻头和辅助工具、井筒完整性、井下宽带信息传输技术等方面开展攻关并力争取得技术突破。结论认为:上述研究和试验成果有力地提升了中石油超深井钻完井的能力和水平,将对中石油油气勘探开发业务起到重要的支撑作用。

关键词 深井 超深井 钻井 技术 进展 挑战 规划 中国石油天然气集团公司

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2017.04.001

Technologies in deep and ultra-deep well drilling: Present status, challenges and future trend in the 13th Five-Year Plan period (2016–2020)

Wang Haige, Ge Yunhua & Shi Lin

(Drilling Research Institute of CNPC, Beijing 102206, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 37, ISSUE 4, pp.1-8, 4/25/2017. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: During the 12th Five-Year Plan period (2011–2015), CNPC independently developed a series of new drilling equipment, tools and chemical materials for deep and ultra-deep wells, including six packages of key drilling equipments: rigs for wells up to 8 000 m deep, quadruple-joint-stand rigs, automatic pipe handling devices for rigs for wells being 5 000/7 000 m deep, managed pressure drilling systems & equipments, gas/fuel alternative combustion engine units, and air/gas/underbalanced drilling systems; seven sets of key drilling tools: automatic vertical drilling tools, downhole turbine tools, high-performance PDC bits, hybrid bits, bit jet pulsation devices, no-drilling-surprise monitoring system, & casing running devices for top drive; and five kinds of drilling fluids and cementing slurries: high temperature and high density water-based drilling fluids, oil-based drilling fluids, high temperature and large temperature difference cementing slurry, and ductile cement slurry system. These new development technologies have played an important role in supporting China's oil and gas exploration and development business. During the following 13th Five-Year Plan period (2016–2020), there are still many challenges to the drilling of deep and ultra-deep wells, such as high temperatures, high pressures, narrow pressure window, wellbore integrity and so on, as well as the enormous pressure on cost reduction and efficiency improvement. Therefore, the future development trend will be focused on the development of efficient and mobile rigs, high-performance drill bits and auxiliary tools, techniques for wellbore integrity and downhole broadband telemetry, etc. In conclusion, this study will help improve the ability and level of drilling ultra-deep wells and provide support for oil and gas exploration and development services in China.

Keywords: Deep well; Ultra-deep well; Drilling techniques; Progress; Challenge; Strategy; CNPC

基金项目: 国家自然科学基金石油化工联合基金重点支持项目“深层高温高压油气井安全高效钻完井基础研究”(编号: U1562212)、国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”课题 20“深井超深井钻井关键技术与装备”(编号: 2016ZX05020-003)。

作者简介: 汪海阁, 1967 年生, 教授级高级工程师, 博士生导师, 本刊第八届编委会委员; 现为中国石油集团钻井工程技术研究院战略规划研究所所长, 长期从事钻井科研、规划与技术支持等方面的工作, 中国石油天然气集团公司高级技术专家, 享受国务院政府特殊津贴, 入选新世纪国家百千万人才工程。地址: (102206)北京市昌平区沙河镇西沙屯桥西中国石油创新基地 A34 地块 A718 房间。电话: (010) 80162236。ORCID: 0000-0003-0905-645X。E-mail: wanghaigedri@cnpc.com.cn

“十二五”以来,中国石油天然气集团公司(以下简称中石油)依托国家、集团公司、股份有限公司相关科技专项,对深井超深井钻完井所面临的问题进行了系统攻关,形成了一批具有自主知识产权的重大装备、工具、仪器、工作液等,支撑了塔里木盆地(以下简称塔里木)库车山前、四川盆地川渝大气区(以下简称川渝气区)的建设。同时随着钻井装备和配套工艺技术的不断进步,钻深能力也逐步提高。

当前油气勘探开发面对资源品质劣质化、油气目标复杂化、安全环保严格化等的严峻挑战,全球油气勘探开发目标正从浅层向深层、超深层发展。在此形势下,深井超深井钻完井技术也遭遇了新的难题和挑战。

1 “十二五”深井超深井钻完井技术进展

“十二五”期间,中石油依托国家油气专项、集团公司专项和其他各类攻关项目,自主成功研发了自动垂直钻井系统、控压钻井、新型钻机等一批重大核心技术装备,大幅度提高了装备自给率,增强了核心竞争力。深井超深井优快钻完井配套技术不断完善,事故复杂时效不断下降,钻井周期大幅缩短,有效支撑了塔里木库车山前、川渝气区安岳气田等重点地区油气规模增储和快速上产^[1-11]。与此同时,深井超深井数量近年来也有了快速增长,图1给出了近年来中石油深井超深井钻井数量的变化情况。

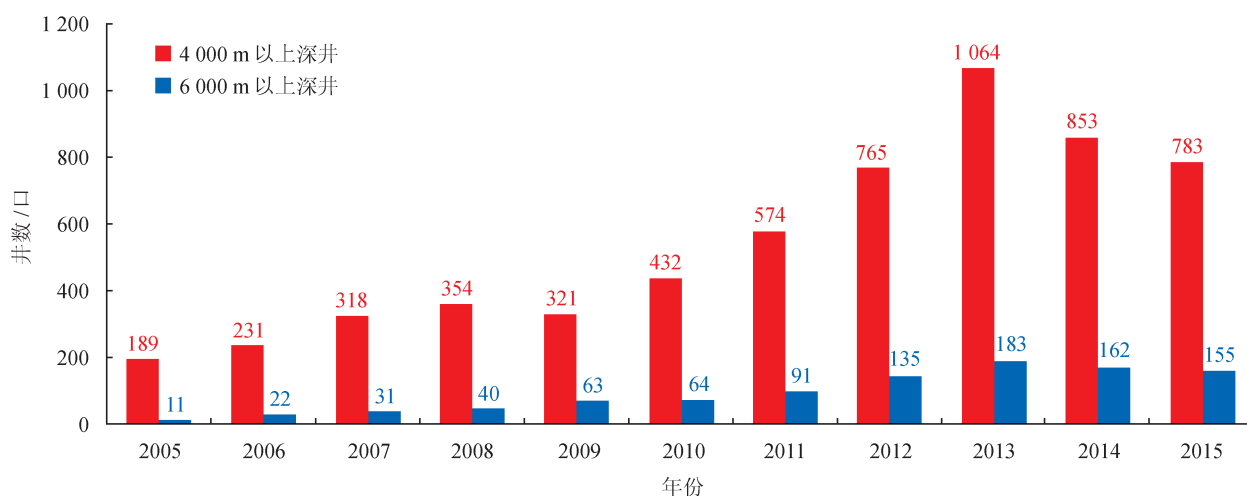


图1 中石油近年来深井超深井数量统计对比图

2015年库车山前重点地区完成井平均钻井周期290 d,与2010年相比缩短44%(缩短237 d),单井节约钻机费用在1 000万元以上;2015年大北—克深区块事故复杂时效6.2%,与2010年相比下降55.3%;2014—2015年完成了23口7 000 m以上超深井,平均钻井周期315 d,同比2010年完成的克深1井缩短347 d。表1给出了塔里木库车山前“十二五”主要钻井指标对比情况。川渝气区安岳气田震旦系5 000~5 800 m探井钻井周期由第一轮189 d缩短到第三轮的149 d。寒武系龙王庙组气藏直井平均钻井周期仅97 d,水平井平均钻井周期146 d,最短只有114 d,为龙王庙组气藏的高效开发提供了重要技术支撑。

1.1 快速成功研发8 000 m钻机和9 000 m四单根—立柱钻机,成为山前复杂深井主力钻井装备^[12-14]

创新钻机设计理念,快速成功研发8 000 m钻机,

表1 塔里木库车山前“十二五”主要钻井指标表

年度	完钻井深 /m	钻井周期 /d	机械钻速 (m·h ⁻¹)
2011	6 774	478	1.49
2012	6 318	330	2.26
2013	6 480	270	2.45
2014	6 897	320	2.38
2015	7 341	330	2.71

解决了塔里木山前等地区7 000 m钻机大套管深下负荷不够与9 000 m钻机使用成本过高之间的矛盾,填补了国内钻机系列空白,推广应用23套,成为塔里木库车山前复杂深井主力钻井装备,实现大套管下深一次性封盐层,将井身结构由原来的“五开”降为“四开”。与9 000 m钻机相比,节省设备购置采购成本约20%,减少钻井生产运行费用37%。

创新提出“四单根一立柱”理念,研制成功国内首台4单根立柱9 000 m钻机,成功完成塔里木大北305井7515 m钻井作业,同比邻井3单根立柱9 000 m钻机,起下钻综合提速15%,减少井下复杂20%,钻井周期缩短6%,节约钻井成本400余万元,为超深井钻井提速提效再添新利器,使深井超深井优快钻完井配套技术不断完善。

1.2 精细控压钻井成套装备取代进口,成为窄密度窗口地层安全钻井的有效技术^[8-9]

中国石油集团钻井工程技术研究院(以下简称钻井院)、中国石油川庆钻探工程公司(以下简称川庆钻探)、中国石油西部钻探工程公司(以下简称西部钻探)分别研制成功PCDS-I、CQMPD-I和XZMPD-I精细控压钻井系统,达到了国外同类技术的先进水平,井底压力控制精度 ± 0.35 MPa,可进行近平衡、欠平衡精细控压钻井作业,适用于各种钻井工况。实现了“看着井底压力来打井”,为解决窄泥浆密度窗口造成的井漏、井涌、井壁失稳和卡钻等钻井复杂提供了有效的技术手段。在塔里木、川渝和海外等地区应用200多口井,有效解决了“喷漏共存”的钻井难题,为塔中I号构造奥陶系储层水平井开发方案的实施、安岳气田建设、川渝页岩气开发等都提供了强力技术支撑。成功开拓印度尼西亚等海外技术服务市场,具备了与国际知名技术服务公司同台竞技的能力,成为海相碳酸盐岩油气藏、高温高压窄密度窗口油气藏勘探开发必备的高效钻井技术。

1.3 自动垂直钻井工具逐步替代进口,成为山前地区防斜打快的核心技术^[15-16]

中国石油渤海钻探工程公司和西部钻探相继研制成功BH-VDT和XZ-AVDS系列自动垂直钻井系统,能够满足 $\varnothing 215.9$ mm到 $\varnothing 558.8$ mm井眼钻井防斜打快需要,井斜角能够控制在 1° 以内,整体性能达到国外同类产品的水平。在塔里木山前地区逐步替代国外产品,大幅度降低了技术使用成本,为解决山前高陡构造和逆掩推覆体等复杂地质条件下的防斜打快钻井难题提供了自主技术支持。在克深2-1-14井创造最高日进尺742 m、在大北101-2井创造单趟钻进尺2 047 m,在青海柴达木盆地鄂探1井创造单趟钻入井时间395.5 h等纪录。自动垂直钻井工具的成功研发和推广应用,彻底解决了山前高陡构造和逆掩推覆体地层防斜打快难题,保障了井眼质量,为井筒完整性控制奠定了很好的基础。

1.4 气体/欠平衡钻井技术与装备不断完善,防漏治漏及应对出水地层的能力不断提升,支撑了川渝等地区复杂地层钻井提速^[4,7,17]

基于“十一五”气体/欠平衡钻井成套装备,结合生产中遇到的实际难题,研制出气密封套管阀、高压级别旋转防喷器、气体钻井连续循环阀等装置,提高了气体/欠平衡钻井技术能力,产品性能指标达到国际先进水平,并使我国的气体/欠平衡钻井能力达到了世界领先水平。在四川、塔里木、松辽等盆地深井超深井推广应用331口井,总进尺 43.69×10^4 m。其中提速应用231口井,平均机械钻速同比钻井液钻井提高3.78~11.24倍。防漏、治漏应用40口井,累计减少钻井液漏失量超过 20×10^4 m³,平均每口井节约井漏复杂处理时间12.5 d。

1.5 钻井液技术取得长足进步,大幅度降低了深井超深井事故复杂时效^[2,3,7,17,18]

“十二五”期间,深井超深井钻井液技术的主要进步体现在由水基钻井液向油基钻井液的转化,以及为应对环保压力而研制成功的高性能水基钻井液(类油基钻井液)。自主研制出高密度油基钻井液系列主辅乳化剂、降滤失剂、流型调节剂等多种核心处理剂,实现产业化,替代进口产品,降低成本30%。研制成功“全油基、油包水、合成基”3套油基钻井液体系,适应不同温度和密度的需要,健全了油基钻井液系列;形成了油基钻井液配制与维护、回收再利用和废弃物无害化处理等完整的技术产业链和服务体系,逐步取代进口成为复杂深井安全快速钻井的关键技术。渤海钻探研制的BH-WEI强抑制、高润滑钻井液体系与使用进口钻井液相比,费用减少50%,实现了低成本国产化目标。高温高密度饱和盐水钻井液和钾钙基有机盐钻井液性能指标大幅度提升,试验应用井平均复杂事故率降低50%以上,成为塔里木盆地、川渝气区和海外复杂深井提速提效的主体钻井液技术。

1.6 固井技术能力不断提升,满足了深层高温、大温差井对固井技术的要求^[3,7,19-21]

高温大温差固井水泥浆体系解决了高温长封固段、大温差固井超缓凝固井的难题,在塔里木、四川、渤海湾等盆地和吉林地区深层推广应用1 000多口井。应用最高温度162℃,最长封固段3 000 m,最大温差80℃。束探1H井创华北油田一次水泥封固最长纪录,牛东102井创华北油田 $\varnothing 177.8$ mm尾管下入最深纪录(5 989 m),龙深2平1井创吉林油田

井下最复杂、固井质量最好纪录（优质率 98%）。四川高石梯—磨溪区块形成以高密度大温差水泥浆体系、正反注固井工艺、抗污染隔离液、浆柱结构优化、封隔式尾管悬挂器为核心的 $\varnothing 177.8$ mm 尾管防气窜固井技术，基本杜绝了喇叭口窜气问题。韧性水泥浆体系解决了交变应力下的水泥石机械强度适应性难题，已成为深井超深井、储气库固井的主体技术。

1.7 一批具有自主知识产权的钻井提速工具正逐步成为深井超深井提速的主体技术^[1,3,7,11,17]

高效 PDC 钻头、复合钻头、孕镶钻头、抗高温螺杆钻具、等壁厚螺杆、金属螺杆、涡轮钻具、水力脉冲破岩工具、司钻节能提速导航系统等一批提速工具正逐步成为深井超深井钻井提速的主力技术。司钻节能提速导航系统突破破岩能效优化关键技术，通过实时采集钻井参数，基于内置软件对井下工况的自动智能识别，实时跟踪量化评价井下钻头破岩能效、井下钻柱振动状态等，进行钻井参数优化，规避井下振动，实时指示司钻施加最优钻压、转速、泵冲等参数，实现了钻速与破岩能耗的最佳匹配。该系统在玉门、塔里木、川渝等油气田应用 50 井次，同比邻井机械钻速分别提高了 20% ~ 50%。2015 年 5 月，荣获第 45 届美国 E&P 工程创新奖（图 2），也是中石油有史以来首次获得此项殊荣，2017 年 3 月荣获第六届中国国际石油石化装备展产品创新金奖。



图 2 第 45 届美国 E&P 工程创新奖

2 “十三五”深井超深井钻完井技术所面临的挑战

深层石油资源量占比为 30%，天然气资源量占比为 60%，是陆上剩余资源量最多、发展潜力最大、钻井挑战最多的领域。塔里木库车山前、四川安岳、渤海湾深层平均井深超过 6 000 m，塔里木油田

“十三五”天然气主要增储上产区块—克深地区平均井深接近 7 000 m，川东盐下储层、川西目前勘探领域平均井深都超过 7 000 m。图 3 所示为中石油塔里木库车山前和川渝重点探区井深统计情况。

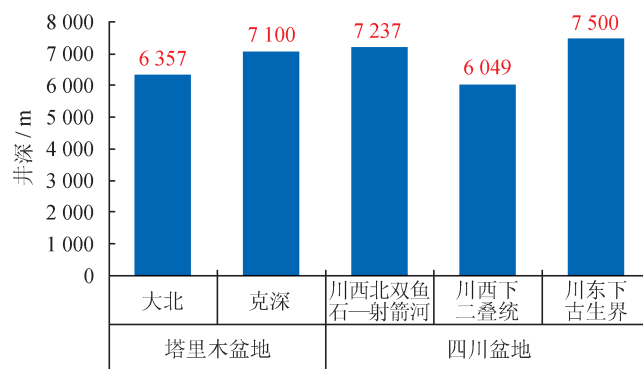


图 3 塔里木库车山前、川渝气区重点勘探区块平均井深图

随着油气勘探开发对象的不断复杂化，井深不断增加，高温高压更加常见，技术新挑战（大温差、大压差）不断出现，导致钻井过程中事故复杂时效较高，钻井成本居高不下，对深井超深井钻井提出了新的更高的要求。储层改造技术的进步将影响钻井主流井型，未来“超深井 + 水平井 + 储层改造”将成为最大的技术挑战。图 4 给出了近 3 年中石油塔里木库车山前和川渝气区 6 000 m 以上超深井钻井事故复杂时效统计结果。

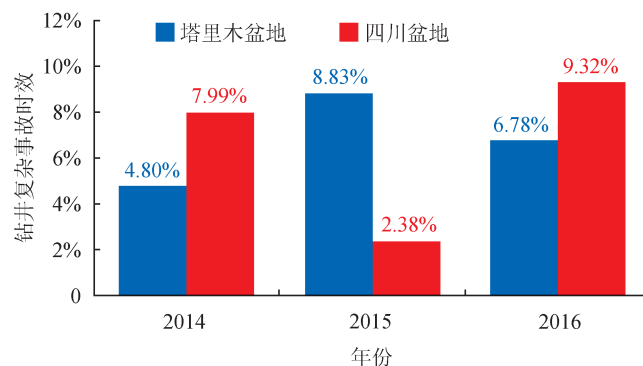


图 4 近年来塔里木库车山前、川渝气区 6 000 m 以上超深井事故复杂时效统计图

2.1 中石油深井超深井钻完井技术与国外对标^[7,17,22-29]

目前国外发达国家深层超深层钻井技术成熟配套，钻机钻深能力达到 15 000 m，配套装备实现自动化、智能化控制，正在研发连续起下连续循环自动化钻机；深层破岩钻头和辅助破岩工具系列齐全，长寿命 PDC 钻头、抗高温牙轮钻头、孕镶钻头、复合结构钻头等技术成熟，规模化应用；高温水基钻

井液、油基钻井液成熟应用；随钻测量与控制技术较成熟，工具抗温能力强，测量参数多，传输速率高，系统可靠性好，高端产品自动垂直钻井工具、旋转导向系统成熟应用，智能钻杆、随钻地震前探技术进入现场应用阶段；深层固井技术适应高温高压和长封固段的大温差大压差的工况要求；注水泥装备，固井工具和水泥浆体系技术成熟，正在开发新一代的固井新材料；深层储层改造等技术相对成熟，抗高温压裂液、分段工具、地面压裂装备成熟配套；连续管作业技术与装备性能不断提升，应用领域不断拓展，广泛应用于深层作业和储层改造。

中石油目前 6 000 m 以内井深钻完井技术正趋于成熟、7 000 ~ 8 000 m 钻完井技术取得重大突破，其中万米级钻机及顶驱、气体钻井、欠平衡钻井和控压钻井、高温高压固井、高温高密度水基钻井液等达到国际先进水平。自动化、智能化钻井技术则刚刚起步，高研磨性地层高效破岩技术尚需进一步攻关完善，破岩工具稳定性、可靠性较差，随钻测控工具耐温压能力不足、适应性差，储层改造技术单一。深层超深层钻头和井下动力钻具，抗高温随钻测量工具，超深井固井完井工具等依赖进口或国外服务。

2.2 中石油深井超深井钻完井技术所面临的挑战^[7,17,29-31]

未来相当长的时间内，深井超深井面临的最大挑战主要表现在：深层超深层岩石致密难钻，问题岩层多、压力系统复杂，准确预测难；深度增加凸显钻机低效；II级高温高压（压力 137.9 MPa，温度 204℃）钻井装备工具适应能力不足，III级高温高压（压力 206.8 MPa，温度 260℃）钻完井技术基本属于空白；深部高研磨性地层破岩效率低、钻速慢；深层储层改造程度低；多压力系统与井身结构层次的矛盾等。

上述挑战的存在，对未来技术的发展提出了更高要求，也明确了技术攻关的方向和目标：自动化、智能化钻完井技术装备，抗高温井下高效破岩工具和随钻测控工具，高温高压井筒工作液及固井完井技术，高温高压试油测试装备，深层高效改造技术与装备。

3 “十三五”中石油深井超深井钻完井技术的发展方向

3.1 深井超深井钻完井技术发展思路^[32-33]

坚持“主营业务战略驱动、生产目标导向、顶层设计”的科技理念，瞄准前沿技术，强化前沿技

术获取与发展，占领制高点；加强技术自主创新和新技术的引进与吸收，保持优势领域技术领先；加快核心技术赶超，提高竞争能力；整合优势特色技术，加快生产“瓶颈”技术的攻关，解决生产问题；发展业务链延伸技术，保障可持续发展。

强化井筒全寿命周期完整性管理理念，采取最有效的技术手段，延长井筒寿命，最大限度地保障油气勘探开发效益。

强化工程地质一体化协同创新理念，培育发展一批跨专业、跨领域核心关键技术，为解决深井超深井生产瓶颈难题提供利器。

以深层自动化、智能化钻井装备为引领，推动深井超深井钻井装备快速发展，打造中国制造钻井品牌，提升主营业务保障力和国际竞争力；以信息化、大数据、工程软件为助力，实现钻井信息与服务业务升级；以速度、质量、可靠性为关键指标，合力协同创新推进随钻测量技术跨越式发展；以储层改造为关键着力点，实现地质工程一体化的增储上产；以储备研发为主要对象，采取革命性措施，大幅提高创新能力。

3.2 深井超深井钻完井技术发展目标^[32-33]

“十三五”中石油深井/超深井钻井技术整体上要力争达到国际先进水平，研制深井自动化钻机、钻井智能优化与远程决策支持系统等多项核心装备、工具及软件；创新发展与超前储备无钻机钻探、随钻地震地质导向、深层储层改造、旋转前探地质导向等关键技术。深层超深层缩短钻完井周期 15%，复杂时效降低 50%。

“十三五”预期新研发形成深井自动化钻机、140 MPa/175℃试油测试成套装备等核心装备，大压差固井工作液、新型双保钻井液等工作液，高效钻头、小尺寸井下安全监控系统、高速大容量信息传输钻杆等高端工具，钻井智能优化与远程决策支持系统等核心软件。

3.3 深井超深井钻完井技术发展方向与规划部署^[32-33]

根据中石油“十三五”钻井科技发展思路与目标，按照突出国家项目与企业项目一体化设计、突出满足主营业务重大需求、突出增强科技长远发展能力、突出促进科技成果转化应用的规划部署原则，针对基础性、装备技术、集成配套等方面的薄弱环节，统筹安排部署国家重大科技专项和企业重大科技专项。

3.3.1 深层复杂井钻完井新技术与新方法研究

针对深层及复杂地层井筒工况条件差、新挑战

艰巨等问题,开展无钻机钻探、高效破岩、井筒工作液新材料、深层储层改造、随钻地层前探等方面的研究。无钻机钻探、高效破岩等技术达到国际先进水平,形成非接触破岩、井筒完整性等新理论,重点突破随钻地层前探和超深井储层改造试油技术,形成可工业化应用的深层钻完井关键技术,为企业钻井技术可持续发展提供基础支撑。

重点开展以下研究工作:①大型体积压裂条件下提高固井质量与井筒完整性新技术,主要包括微膨胀韧性大温差水泥浆、高强韧性大压差水泥浆、防漏水泥浆、高效油基钻井液冲洗前置液等;②无钻机钻探技术,包括新型钻探器的总体设计、实验室建设、单元原型实验样机等;③高研磨地层高效破岩新技术新方法新材料,主要包括新型钻头、高频震动破岩、井下振动随钻管理、非接触破岩等;④井筒工作液新材料新体系基础研究,主要包括新一代井筒工作液、环保型钻井液及处理剂、广谱外加剂、固井新材料等;⑤复杂深井与水平井井筒完整性力学机理及控制技术,主要包括水泥密封完整性机理、全寿命周期钻完井管柱设计、页岩微压裂地应力检测、套损防治及井筒完整性检测技术等;⑥苛刻服役条件下油井管工程应用基础研究,主要包括高性能油井管材研究等;⑦超深井储层改造与试油关键技术,主要包括一体化完井管柱及工艺流程、相关技术设备、聚能射孔技术等;⑧井下控制工程学与随钻地层前探技术,主要包括随钻地层前探方法等。

3.3.2 深井超深井自动化与高效钻完井新装备新工具研制

针对深井超深井工程地质条件复杂、核心技术薄弱等问题,开展自动化、智能化钻井技术与装备、随钻测控技术与装备,形成安全高效钻完井配套技术,为深层油气高效勘探开发提供技术支撑。

重点开展以下工作:①深井超深井自动化钻井技术及装备,主要包括深井超深井高效快速钻井技术与装备、随钻地震波测量技术及高温随钻测量装备等;②连续起下钻井关键技术装备;③高效辅助破岩与完井试油关键工具,主要包括钻井提速配套工具及深层高效破岩钻头、耐高温旋转自动脱挂尾管悬挂器、高压气井井下安全阀、耐高压封隔器、完井试油一体化工具研制等;④高强低密度油井管,主要包括高强低密度高性价比管材开发等;⑤钻井工程设计与控制一体化软件,主要包括钻井工程设计与控制一体化软件升级版、钻井实时优化与远程专家会诊决策支持系统开发等。

3.3.3 钻完井技术集成试验与推广应用

完善升级和试验定型一批钻完井核心技术与装备。重点突破高速大容量信息传输、5 000/7 000 m 钻机管柱自动化处理装置、膨胀管钻井等核心技术与装备,形成深井超深井钻完井与试油测试等核心配套技术,实现规模化应用。

重点开展以下试验:①钻井重大新技术、新装备、新工具现场试验,主要包括 5 000/7 000 m 钻机管柱自动化处理系统、电动钻机 175 柴油机发电机组、粒子冲击钻井技术、高速大容量信息传输与智能钻杆、井下随钻安全监控、膨胀管钻井技术与装备等现场试验;②含硫复杂地层安全钻完井技术集成与应用;③高温高压高酸性介质油气井完井技术集成与应用;④复杂探区优快钻完井技术集成与应用等。

4 结论与建议

“十二五”期间中石油深井超深井钻完井技术得到了快速发展,在新型钻机、控压钻井、垂直钻井、油基钻井液、大温差固井和韧性水泥浆等方面取得了突破,事故复杂得到有效控制,机械钻速大幅度提高,钻井周期不断缩短,对支撑中石油勘探开发业务发展,提升钻井国内外竞争力发挥了重要作用。

随着油气勘探开发进一步向深层挺进,川渝气区、塔里木库车山前等“十三五”中石油重点油气增储上产地区仍然面临着很多技术挑战以及低油价所带来的成本压力,建议“十三五”期间重点在深层复杂井钻完井新技术与新方法、深井超深井自动化与高效钻完井新装备新工具、钻完井技术集成试验与推广应用等方面开展攻关和试验,力争在“十三五”末中石油深井/超深井钻井技术整体上达到国际先进水平。

参 考 文 献

- [1] 邓传光,张军,常洪渠,黄媚,刘强.高石梯—磨溪区块探井钻井提速配套技术及其应用效果[J].天然气工业,2014,34(3): 115-120.
Deng Chuanguang, Zhang Jun, Chang Hongqu, Huang Mei & Liu Qiang. ROP enhancement techniques and their application in deep exploratory wells in the Gaoshiti-Moxi block Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(3): 115-120.
- [2] 李向碧,郑有成,王兰.KCl—有机盐钻井液在高石梯—磨溪区块上部井段钻井提速中的应用[J].天然气工业,2014,34(3): 121-125.
Li Xiangbi, Zheng Youcheng & Wang Lan. Application of KCl-or-

- ganic salt drilling fluids to the ROP enhancement in the top section of wells in the Gaoshiti-Moxi block, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(3): 121-125.
- [3] 滕学清, 陈勉, 杨沛, 李宁, 周波. 库车前陆盆地超深井全井筒提速技术[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(1): 76-88.
- Teng Xueqing, Chen Mian, Yang Pei, Li Ning & Zhou Bo. Whole well ROP enhancement technology for super-deep wells in Kuqa foreland basin[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(1): 76-88.
- [4] 邓虎, 胥志雄, 王怀金, 许期聪, 邓柯. 塔里木盆地山前巨厚砾石层快速钻井技术[J]. 天然气工业, 2014, 34(10): 66-70.
- Deng Hu, Xu Zhixiong, Wang Huaijin, Xu Qicong & Deng Ke. Technologies in enhancing the ROP by air drilling through the piedmont gravel layers with huge thickness in the Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(10): 66-70.
- [5] 谭茂波, 何世明, 邓传光, 米光勇, 高德伟, 王强. 龙岗西地区首口非常规超深井钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(2): 19-23.
- Tan Maobo, He Shiming, Deng Chuanguang, Mi Guangyong, Gao Dewei & Wang Qiang. Drilling technology for the first unconventional ultra-deep well in West Longgang Region[J]. Oil Drilling & Production, 2015, 37(2): 19-23.
- [6] 高德伟, 王强, 李文哲, 邓广东, 周剑, 易斌, 等. 川西地区深井非常规井身结构设计与实践——以九龙山构造龙 004-X1 井为例[J]. 天然气工业, 2015, 35(4): 82-87.
- Gao Dewei, Wang Qiang, Li Wenzhe, Deng Guangdong, Zhou Jian, Yi Bin, et al. Design and application of unconventional casing program in deep wells, western Sichuan Basin: A case study of Well Long-004-X1 in the Jiulongshan Structure[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(4): 82-87.
- [7] 石林, 汪海阁, 纪国栋. 中石油钻井工程技术现状、挑战及发展趋势[J]. 天然气工业, 2013, 33(10): 1-10.
- Shi Lin, Wang Haige & Ji Guodong. Current situation, challenges and developing trend of CNPC's oil & gas drilling[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(10): 1-10.
- [8] 张兴全, 周英操, 刘伟, 姜智博. 控压欠平衡钻井井口回压控制技术[J]. 天然气工业, 2013, 33(10): 75-79.
- Zhang Xingquan, Zhou Yingcao, Liu Wei & Jiang Zhibo. Wellhead backpressure control in under-balanced and managed pressure drilling[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(10): 75-79.
- [9] 晏凌, 吴会胜, 晏琰. 精细控压钻井技术在喷漏同存复杂井中的应用[J]. 天然气工业, 2015, 35(2): 59-63.
- Yan Ling, Wu Huisheng & Yan Yan. Application of precise MPD in kick & loss wells[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(2): 59-63.
- [10] 张俊良, 文绍牧, 邵勇, 雷震中, Love T. 高含硫气井安全高效钻井井配套技术——以川东北罗家寨气田为例[J]. 天然气工业, 2015, 35(4): 68-75.
- Zhang Junliang, Wen Shaomu, Shao Yong, Lei Zhenzhong & Love T. Safe and efficient drilling and completion technologies for high-sulfur gas wells: A case history of the Luoiazhai Gas-field in the Northeastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(4): 68-75.
- [11] 许京国, 陶瑞东, 郑智冬, 杨静, 张建荣. 牙轮—PDC 混合钻头在迪北 103 井的应用试验[J]. 天然气工业, 2014, 34(10): 71-74.
- Xu Jingguo, Tao Ruidong, Zheng Zhidong, Yang Jing & Zhang Jianrong. Pilot tests of a roller-PDC hybrid bit in Well Dibe 103, Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(10): 71-74.
- [12] 王定亚, 忽宝民. 提速提效石油钻机技术现状及发展思路[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(9): 45-48.
- Wang Dingya & Hu Baomin. Technology status and development trend for more efficient drilling rig[J]. Oil Field Equipment, 2016, 45(9): 45-48.
- [13] 张鹏飞, 朱永庆, 张青锋, 宋志刚, 王玉, 梁春平, 等. 石油钻机自动化、智能化技术研究和发 展建议[J]. 石油机械, 2015, 43(10): 13-17.
- Zhang Pengfei, Zhu Yongqing, Zhang Qingfeng, Song Zhigang, Wang Yu, Liang Chunping, et al. Research and development of automatic and intelligent technologies for drilling rig[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(10): 13-17.
- [14] 于兴军, 宋志刚, 魏培静, 张润松, 曹振兴, 李庆福, 等. 国内石油钻机自动化技术现状与建议[J]. 石油机械, 2014, 42(11): 25-29.
- Yu Xingjun, Song Zhigang, Wei Peijing, Zhang Runsong, Cao Zhenxing, Li Qingfu, et al. The technical status and recommendations on the domestic drilling rig automation[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(11): 25-29.
- [15] 汝大军, 张健庚, 周胜鹏, 马哲, 虞海法, 郝楠. BH-VDT5000 垂直钻井系统在克深 203 井的应用[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(4): 1-3.
- Ru Dajun, Zhang Jiangeng, Zhou Shengpeng, Ma Zhe, Yu Haifa & Hao Nan. Application of the vertical drilling system BH-VDT5000 on Well Keshen 203[J]. Oil Drilling & Production, 2012, 34(4): 1-3.
- [16] 王闻涛, 王小通, 杨晓勇, 张彬, 余朋伟, 何俊杰, 等. 全旋转推靠式自动垂直钻井工具现场试验分析[J]. 石油机械, 2015, 43(9): 24-27.
- Wang Wentao, Wang Xiaotong, Yang Xiaoyong, Zhang Bin, Yu Pengwei, He Junjie, et al. Field test of full-rotation backup-type automatic vertical drilling tool[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(9): 24-27.
- [17] 汪海阁, 王灵碧, 纪国栋, 卓鲁斌, 毕文欣, 刘力. 国内外钻完井技术新进展[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(5): 1-12.
- Wang Haige, Wang Lingbi, Ji Guodong, Zhuo Lubin, Bi Wenxin & Liu Li. Advances in well drilling and completion technologies for domestic and overseas[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(5): 1-12.
- [18] 李晓阳, 张坤, 吴先忠, 晏凌, 陈怀高, 王多金. LG 地区超深井钻井液技术[J]. 天然气工业, 2009, 29(10): 62-64.
- Li Xiaoyang, Zhang Kun, Wu Xianzhong, Yan Ling, Chen Huigao & Wang Duojin. Drilling fluid technology for the ultra-deep wells in the LG area[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(10): 62-64.
- [19] 李早元, 李进, 郭小阳, 李宁, 董广超. 固井早期气窜预测新方法及其应用[J]. 天然气工业, 2014, 34(10): 75-82.
- Li Zaoyuan, Li Jin, Guo Xiaoyang, Li Ning & Dong Guangchao.

- A new method of predicting gas channeling at the early stage of cementing[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(10): 75-82.
- [20] 刘洋, 严海兵, 余鑫, 冯予淇, 范伟华. 井内压力变化对水泥环密封完整性的影响及对策[J]. *天然气工业*, 2014, 34(4): 95-98.
Liu Yang, Yan Haibing, Yu Xin, Feng Yuqi & Fan Weihua. Negative impacts of borehole pressure change on cement sheath sealing integrity and countermeasures[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(4): 95-98.
- [21] 郭辛阳, 步玉环, 李娟, 李强. 井下复杂条件下固井水泥环的失效方式及其预防措施[J]. *天然气工业*, 2013, 33(11): 86-91.
Guo Xinyang, Bu Yuhuan, Li Juan & Li Qiang. Modes and prevention of cement sheath failures under complex downhole conditions[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(11): 86-91.
- [22] 龙刚, 刘伟, 管志川, 唐洪卫, 江波. 元坝地区陆相地层钻井提速配套技术[J]. *天然气工业*, 2013, 33(7): 80-84.
Long Gang, Liu Wei, Guan Zhichuan, Tang Hongwei & Jiang Bo. ROP enhancing technologies for ultra-deep wells in the continental strata in the Yuanba Gas Field, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(7): 80-84.
- [23] 夏家祥, 杨昌学, 王兴忠. 元坝气田超深酸性气藏钻完井关键技术[J]. *天然气工业*, 2016, 36(9): 90-95.
Xia Jiaxiang, Yang Changxue & Wang Xingzhong. Key technologies for well drilling and completion in ultra-deep sour gas reservoirs, Yuanba Gasfield, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(9): 90-95.
- [24] 张金成, 牛新明, 张进双. 超深井钻井技术研究及工业化应用[J]. *探矿工程 (岩土钻掘工程)*, 2015, 42(1): 3-11.
Zhang Jincheng, Niu Xinming & Zhang Jinshuang. Research and industrial application of drilling technology of ultra-deep wells[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2015, 42(1): 3-11.
- [25] 罗人文, 龙大清, 王昆, 范建国, 吕佳, 白晶. 马深 1 井超深井钻井液技术[J]. *石油钻采工艺*, 2016, 38(5): 588-593.
Luo Renwen, Long Daqing, Wang Kun, Fan Jianguo, Lü Jia & Bai Jing. Drilling fluid for the super-deep well Mashen-1[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2016, 38(5): 588-593.
- [26] 吴正良, 甘平西, 王悦坚. 塔深 1 井 8408 米超深井钻井液技术[J]. *钻采工艺*, 2008, 31(5): 17-21.
Wu Zhengliang, Gan Pingxi & Wang Yuejian. Drilling fluid technology of Tashen well 1[J]. *Drilling & Production Technology*, 2008, 31(5): 17-21.
- [27] 李伟廷. 元坝 1 井超深井钻井技术[J]. *石油钻探技术*, 2009, 37(2): 94-99.
Li Weiting. Ultra-deep drilling technologies used on well Yuanba-1[J]. *Drilling Petroleum Techniques*, 2009, 37(2): 94-99.
- [28] 闫光庆, 张金成. 中国石化超深井钻井技术现状与发展建议[J]. *石油钻探技术*, 2013, 41(2): 1-6.
Yan Guangqing & Zhang Jincheng. Status and proposal of the Sinopec ultra-deep drilling technology[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2013, 41(2): 1-6.
- [29] 汪海阁, 郑新权. 中石油深井钻井技术现状与面临的挑战[J]. *石油钻采工艺*, 2005, 27(2): 4-8.
Wang Haige & Zheng Xinquan. Status quo and faced challenges of deep well drilling techniques of PetroChina[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2005, 27(2): 4-8.
- [30] 冯耀荣, 韩礼红, 张福祥, 白真权, 刘文红. 油气井管柱完整性技术研究进展与展望[J]. *天然气工业*, 2014, 34(11): 73-81.
Feng Yaorong, Han Lihong, Zhang Fuxiang, Bai Zhenquan & Liu Wenhong. Research progress and prospect of oil and gas well tubing string integrity technology[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(11): 73-81.
- [31] 张建兵, 韩勇, 肖国章. 两种主要高强度套管的耐磨性能试验[J]. *天然气工业*, 2015, 35(2): 64-69.
Zhang Jianbing, Han Yong & Xiao Guozhang. Wear resistance of two kinds of high-strength casings: An experimental study[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(2): 64-69.
- [32] 中国石油天然气集团公司. 中国石油“十三五”钻井科技发展规划[R]. 北京: 中国石油天然气集团公司科技管理部, 2016.
CNPC. The "13th Five Year" drilling technology plan of CNPC[R]. Beijing: CNPC Sci-Tech Management Department, 2016.
- [33] 中国石油集团钻井工程技术研究院. 中国石油工程技术与装备重大专项顶层设计[R]. 北京: 中国石油集团钻井工程技术研究院, 2013.
CNPC Drilling Research Institute. Top design for engineering technology & equipment of CNPC[R]. Beijing: CNPC Drilling Research Institute, 2013.

(收稿日期 2017-04-10 编辑 凌 忠)