

文章编号: 0253-2697(2024)01-0312-13 DOI:10.7623/syxb202401018

# 中国深层—超深层钻完井关键技术及发展方向

刘岩生 张佳伟 黄洪春

(中国石油集团工程技术研究院有限公司 油气钻完井技术国家工程研究中心 北京 102206)

**摘要:** 深层—超深层油气资源是中国油气增储上产的重要接替资源,实现深井、超深井安全优快钻完井对于深层—超深层油气资源效益开发具有重要意义。通过回顾中国深井、超深井发展历程,梳理对比深井、超深井钻完井技术发展现状、关键技术进展及应用效果,结合面临的主要问题指出了下一步的发展方向。通过对比全球及中国深井、超深井钻完井关键钻井装备、井身结构优化与拓展、钻井提速、钻井液、固井、随钻测控技术与装备、试油完井关键技术指标及应用情况,指出抗高温高压、高稳定性是当前存在的主要技术差距。剖析了支撑中国实现陆上 8 000 m 超深井常态化,钻深能力迈上 9 000 m 台阶,正向万米挺进的深井自动化钻机、井身结构优化、控压钻井、高效 PDC 钻头、抗高温超高密度油基钻井液、高效堵漏、高强度韧性水泥浆及自动化固井、抗高温酸压、深层连续管作业机等一批高端装备、尖端工具、核心助剂的最新进展及应用情况。针对超深层超高温、超高压、复杂地应力和多压力系统等给安全高效钻完井带来巨大挑战,提出进一步开展井身结构拓展、抗超高温高压井下工具仪器、超高温井筒工作液、超深高效破岩及提速工具、超高温特高压试油完井工具、超高温低伤害压裂液和酸液体系、数字化智能化钻完井装备与技术等攻关研究,加速关键核心技术的突破与迭代升级,为深层—超深层油气资源高效勘探开发提供支撑与保障。

**关键词:** 深层—超深层油气;钻完井;关键技术;发展现状;发展方向

**中图分类号:** TE242

**文献标识码:** A

## Key technologies and development direction for deep and ultra-deep drilling and completion in China

Liu Yansheng Zhang Jiawei Huang Hongchun

(CNPC Engineering Technology R&D Company Limited; National Engineering Research Center of Oil & Gas Drilling and Completion Technology, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Deep and ultra-deep oil and gas are important replacement resources for increasing reserve and production in China. Therefore, to achieve safe and fast drilling and completion of deep and ultra-deep wells is of great significance for the efficient development of deep and ultra-deep oil and gas resources. By reviewing the development history of deep and ultra-deep wells in China, the paper summarizes and compares the current development status, advance and application of key technologies for deep and ultra-deep well drilling and completion, and further points out the development direction based on the current main problems. Moreover, a comparison has been made on key drilling equipment for well drilling and completion in deep and ultra-deep wells, wellbore structure optimization and expansion, drilling speeding-up, drilling fluid, cementing, downhole measurement and control technology, and key technical performance indicators of oil testing and completion technology and its application status in China and other countries. Then it is pointed out that technical gaps mainly occur as the result of resistance to high temperature and pressure, as well as high stability. Further, an analysis is performed on the latest progress and application of high-end equipment, cutting-edge tools and core additives, including the automatic drilling rigs for deep drilling that can support China to achieve the normalization of 8 000-meter ultra-deep drilling on land, with the drilling capacity of 9 000 meters and drilling depth range extending towards 10 000 meters, wellbore structure optimization, controlled pressure drilling (MPD), efficient PDC bits, high-temperature resistant and ultra-high density oil-based drilling fluids, efficient plugging, high strength and toughness cement slurry, automatic cementing, high temperature resistant acid fracturing, coiled tubing equipment for deep and ultra-deep operation. In view of ultra-high temperature, ultra-high pressure, complex geo-stress and multi pressure systems in ultra-deep layer which pose a great challenge to safe and efficient drilling and completion, the paper proposes that the further research should focus on optimization and expansion of wellbore structure, high temperature and high pressure resistant downhole tools and instruments, ultra-high temperature resistant downhole fluids, efficient rock-breaking and speed-up tools for ultra-deep drilling, ultra-high temperature and pressure resistant testing and completion tools, ultra-high tem-

**基金项目:** 中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目“万米超深层油气资源钻完井关键技术与装备研究”(2022ZG06)和中国石油天然气集团有限公司战略与咨询项目“工程技术与装备迭代升级发展研究”(2023DQ0715)资助。

**第一作者及通信作者:** 刘岩生,男,1966年10月生,1999年获中国石油勘探开发研究院硕士学位,现为中国石油集团工程技术研究院有限公司院长,主要从事钻完井科研与技术支持工作。Email:liuysdri@cnpc.com.cn

perature resistant and low damage acid fracturing fluid, digital intelligent drilling and completion equipment and technology, so as to accelerate the breakthrough and iterative upgrade in key technologies and equipment, support and safeguard the efficient exploration and development of deep and ultra deep oil and gas resources.

**Key words:** deep and ultra-deep oil and gas; drilling and completion; key technologies; development status; development direction

引用: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.

Cite: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.

近 10 年来,全球新发现的油气储层由中—浅层逐渐向深层—超深层转移,深层—超深层领域成为未来全球重要的增储上产领域<sup>[1]</sup>。中国深层油气资源丰富、潜力巨大。据预测,中国深层—超深层油气资源量达  $671 \times 10^8$  t 油当量,占中国油气资源总量的 34%,其中,39%的剩余石油和 57%的剩余天然气资源分布在深层<sup>[2]</sup>,是未来中国增储上产的重要接替领域<sup>[3-4]</sup>,加快深层—超深层油气勘探开发已成为中国重要的油气发展战略<sup>[5-6]</sup>。

中国深层—超深层油气主要分布在塔里木盆地、川渝地区、新疆南缘、松辽盆地深层、渤海湾盆地深层等地区,也是工程技术面临挑战最大、事故复杂最多、难题最集中的区域之一。通过“十四五”(2021—2025 年)持续攻关,现已突破了 7 000 m 深井自动化钻机、8 层井身结构、精细控压钻井、高效 PDC 钻头、抗 240 ℃ 高温超高密度油基钻井液、高效堵漏、膨胀管裸眼封堵、高强度韧性水泥浆及自动化固井、抗 230 ℃ 高温酸压、8 000 m 深层连续管作业机等一批高端装备、尖端工具、核心助剂,支撑 7 000 m 级钻井技术成熟配套并迈向自动化,8 000 m 级超深井钻井技术体系基本形成,钻深能力迈上 9 000 m 台阶<sup>[7-9]</sup>,目前 2 口万米深井钻探正在实施中,很好地支撑了塔里木盆地库车山前、四川盆地海相碳酸盐岩、新疆准噶尔盆地南缘、青海柴达木盆地等重点地区深层—超深层油气勘探开发。

随着勘探的持续深入、井深的增加,面临埋藏深、层位多、多压力系统、压力窗口窄、高陡构造、巨厚砾石层、复合盐膏层等复杂地质条件,超高温、超高压、高地应力、含强腐蚀流体井筒环境给深井、超深井钻完井带来一系列世界级难题,安全优质高效钻完井仍面临严峻挑战,需进一步开展关键核心技术的攻关突破与迭代升级,提升工程技术,从而对深层—超深层油气资源勘探开发起支撑和保障作用。

## 1 全球深井、超深井钻完井技术发展现状

全球范围内具备深井、超深井钻探能力的国家多达 30 多个,苏联、美国、德国等国家先后具备了万米级特深井钻探能力。1960—1962 年,苏联制定并实施了

全球第一个系统化的大陆超深井钻探计划。1970 年,科拉 SG-3 超深井在摩尔曼斯克地区北部开钻并于 1994 年完钻,该井设计深度为 15 000 m,最终完钻井深为 12 263 m。1973—1974 年,美国钻成井深为 9 583 m 的特深勘探井——Berta Rogers 井。1990—1994 年,德国在巴伐利亚州成功钻成 KTB-Oberpfalz 超深科探井,该井井深为 9 101 m。目前,国外陆上深井、超深井主要集中在美国德克萨斯州、怀俄明州、加利福尼亚州、亚利桑那州等地区。2010—2014 年,受油气价格上涨的影响,美国深井、超深井数量快速增加,平均年钻深井数超过千口,但 2015 年后受低油价影响,深井、超深井钻井明显减少。

中国深井、超深井钻探始于 20 世纪 60—70 年代。1966 年,大庆油田钻成中国第一口深井——松基 6 井,井深为 4 719 m,钻井周期为 1 171 d。1976 年,西南油气田钻成中国第一口超深井——女基井,井深为 6 011 m,钻井周期为 1 662 d。1978 年,西南油气田在川西北中坝构造钻成第 1 口井深超过 7 000 m 的超深井——关基井,井深为 7 175 m,钻井周期为 1 093 d。“十三五”(2016—2020 年)以来,随着一系列关键核心钻完井装备、技术及助剂的攻关、突破与应用,中国深井、超深井钻井技术和数量均实现跨越式发展。中国陆上平均年钻 6 000 m 以上的超深井达到 280 余口(图 1),陆上超深井钻井数量首次超过美国<sup>[8]</sup>。2006 年,塔河油田钻成塔深 1 井,井深为 8 408 m,钻井周期为 462 d。2019 年,塔里木油田钻成轮探 1 井,井深为 8 882 m,钻井周期为 360 d。2022 年,西北油田钻成塔深 5 井,井深为 9 017 m。2023 年,西南油气田钻成亚洲最深直井——蓬深 6 井,井深为 9 026 m,垂深为 9 022 m。同年,塔里木油田钻成亚洲最深水平井——果勒 3C 井,井深为 9 396 m,垂深为 8 057 m。目前中国陆上完钻超过 8 000 m 的超深井有 120 余口,其中 5 口井井深超过 9 000 m。

全球超深、特深井主要集中在美国墨西哥湾,为实现墨西哥湾 Lower Tertiary 等超深—特深油气藏效益开发,2000—2010 年,美国成熟配套 12 000 m 级特深井钻完井装备与技术<sup>[10-18]</sup>,代表当前世界范围内深

井、超深井较高的技术水平。2000年至今,壳牌、雪佛龙、道达尔、BP、埃克森美孚等公司在墨西哥湾完钻井深(含水深)超过10 000 m的特深井多达60余口<sup>[19]</sup>,尽管钻完井面临井底超高温、超高压、窄密度窗口、盐膏层、沥青、复杂构造应力等难题,墨西哥湾万米级特深井仍能实现90~260 d内完钻,典型万米特深井钻井周期在120~160 d<sup>[10]</sup>。为应对超深水钻探需求,瑞士TransOcean公司研发的超深水海上钻井平台配备钻机装备具备15 000 m钻深能力,相关装备与技术正向智能化、自动化方向发展。

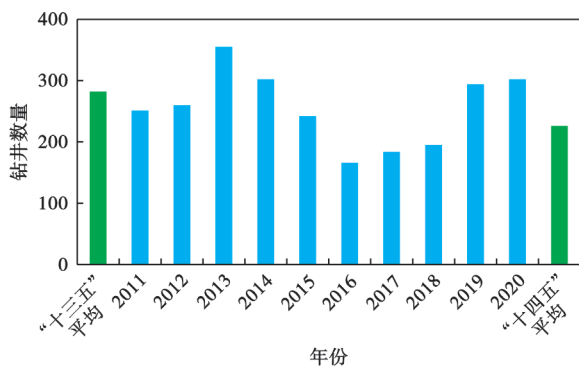


图1 中国近年陆上井深超过6000m的超深井钻井数量

Fig. 1 Number of ultra-deep wells with depth exceeding 6000 m drilled on land in China in recent years

目前,中国深井、超深井配套钻完井技术与装备基本满足9000 m以深特深井的需求,但钻井周期对比美国墨西哥湾超深井仍然存在较大差距。陆地钻机、控压钻井、顶驱、抗高温油基钻井液、适应复杂环境水泥浆等技术达到国际先进水平,但井身结构优化扩展、钻井装备自动化智能化、井下抗高温随钻测控系统、抗高温井下提速工具等技术与国际先进水平仍存在一定差距。

## 1.1 深井、超深井关键钻井装备

### 1.1.1 国外概况

国外已发展了6000~15000 m系列深井钻机、液压钻机、模块化/个性化钻机,形成钻机结构智能监测与远程控制系统,钻井液实时监测与分析系统实现商业化应用;形成载荷能力150~1500 t顶驱系列产品,配备软扭矩、顶驱扭摆减阻、主轴自动定位、远程监测诊断、顶驱下套管等提升钻完井作业安全及效率技术;52 MPa高压钻井泵技术成熟并实现规模应用;井控装备上形成压力等级70~140 MPa环形防喷器、70~175 MPa闸板防喷器、70~105 MPa节流管汇,配备井控装备状态智能监测、远程控制系统;强制循环控温装置实现维持钻井液低温0~-3℃,最高降温50℃;控压钻井装备方面,形成适用于陆地及海上控压钻井系

统,井口控压为12.5 MPa、节流精度为±0.25 MPa,具备智能控压及远程监测与控制能力。

### 1.1.2 中国概况

中国已形成6000~12000 m深井、超深井系列钻机及顶驱设备,研制出“一键操控”的7000 m自动化钻机,8000/9000 m四单根立柱钻机突破钻井管柱稳定作业长度极限(38 m),应用效果显著;顶驱载荷能力为200~1150 t,可满足3000~12000 m钻机的个性化需求,配套顶驱大扭矩、主轴旋转定位控制、导向钻井滑动控制、转速扭矩智能控制、顶驱下套管技术与装置、智能钻机连锁控制接口等特色技术;52 MPa高压钻井泵技术整体趋于成熟并规模应用,70 MPa高压钻井泵研制成功,但钻井泵液力端活塞、阀胶皮等橡胶件使用寿命普遍低于国外进口产品;井控装备上形成70~140 MPa环形及闸板防喷器、70~105 MPa节流压井管汇,配备井控装备状态智能监测及远程控制系统,研发形成一键环形关井开放喷、防喷器控制装置监测、无线遥控、节流压井控制等系统。形成覆盖“钻—测—固—完”全过程的精细控压钻井系统,井口控压能力为12.5 MPa、节流精度为±0.2 MPa,实现井口回压全过程自动调控,相关装备与技术实现成熟配套。

通过对标分析,中国在钻机及顶驱装备、高压钻井泵、压力控制装备等关键核心装备达到国际先进水平,但在装备的自动化、智能化、模块化等方面与国外存在差距。

## 1.2 井身结构优化与拓展

### 1.2.1 国外概况

国外普遍采用“随钻扩眼+膨胀管”实现7~11层井身结构,Φ193.6~215.9 mm(7<sup>5</sup>/<sub>8</sub>~8<sup>1</sup>/<sub>2</sub> in)大尺寸完井<sup>[10,20]</sup>,具备12000 m以深特深井设计与钻探能力;随钻扩眼器规格齐全,并成熟应用于井身结构拓展,单趟扩眼进尺最高超2000 m,配套随钻扩眼全过程动态仿真分析软件。美国亿万奇全球技术公司研制了9种规格膨胀管,膨胀后最高钢级为P110,成为北美、墨西哥湾等地区深井、超深井钻井技术利器,作业最长井段为2113 m,最大下深为8620 m。

### 1.2.2 中国概况

中国主要采用4~7层井身结构,Φ114.3~139.7 mm(4<sup>1</sup>/<sub>2</sub>~5<sup>1</sup>/<sub>2</sub> in)小尺寸完井,成熟配套7000 m超深井井身结构,满足8000~9000 m井身结构设计需求;随钻扩眼技术处于起步阶段,仅在小范围现场试验,单趟扩眼进尺最高超1800 m,最大应用井深为7190 m,工具稳定性不足,设计及应用缺乏动力学仿真手段。中国石油集团工程技术研究院有限公司(中国石油工程院)研制了8种不同尺寸管径膨胀管,胀后最高钢级为P110,并在西南、塔里木、华北等

地区开展了试验应用,最大下深为 6 170 m。

通过对标分析(表 1),中国在膨胀管尺寸及胀后钢级达到国际先进水平,但高承压膨胀螺纹、超抗拉安

全下入工具等关键技术还需完善;随钻扩眼工具在设计、综合性能、施工工艺等方面与国外存有较大差距,亟需开展攻关与研究。

表 1 井身结构拓展关键技术国内外对标

Table 1 Comparison of key technologies for wellbore structure expansion at domestic and abroad

项目	中国	国外
随钻扩眼工具	处于起步阶段,仅在小范围现场试验;稳定性和适应性不足,工具设计及应用缺乏仿真设计手段	成熟应用于井身结构拓展,扩眼工具成熟、规格齐全,单趟扩眼进尺超过 2000 m,无故障作业时间 > 150 h,耐温达 200 °C;形成随钻扩眼全过程动态仿真分析软件,可针对具体工况进行个性化刀翼设计、钻具组合和钻井参数优化
大尺寸膨胀管	最大应用管径为 $\Phi 299$ mm,膨胀管胀后钢级为 P110,高承压膨胀螺纹等关键技术还需完善	最大应用管径为 $\Phi 299$ mm,膨胀管胀后最高钢级为 P110,配套工具及工艺实现成熟应用

### 1.3 钻井提速配套技术

#### 1.3.1 国外概况

国外复合/多级/热压金刚石孕镶钻头、PDC 钻头、复合钻头等多种高效破岩钻头已形成系列化产品并成熟应用,含吃入深度自适应装置、360°旋转齿、非平面切削齿、混合布齿等创新设计不断涌现。随着井下提速工具关键材料、加工工艺方面持续优化升级,抗高温小尺寸垂钻系统、螺杆钻具、涡轮钻具、扭力冲击器、钻井优化提速系统等技术也已成熟并规模化应用。

#### 1.3.2 中国概况

中国常规 PDC 钻头、孕镶金刚石、牙轮-PDC 复合、PDC-孕镶复合等钻头种类齐全,系列化产品成熟应用,但强研磨硬质地层钻头进尺及寿命较短。垂钻系统多用于上部大尺寸井眼配合强化参数实现钻

井提速;常规螺杆钻具具备系列化设计与制造能力,但存在耐高密度钻井液和高温能力不足、能量转换效率和整机性能待提升的问题,抗 200 °C 高温螺杆关键橡胶材料、全金属螺杆设计及加工正在攻关中。涡轮钻具、扭力冲击器、水力脉冲工具、恒扭矩工具、智能钻井司钻导航仪等技术在钻井提速中发挥了积极作用。

通过对标分析(表 2),中国在复合片材料抗冲击性及耐磨性、高效 PDC/复合钻头以及在超高温强研磨地层的可靠性、提速效果、单趟进尺等方面存在差距;垂直钻井系统缺少小尺寸工具、耐温能力与国外存在差距;涡轮钻具寿命及功率、螺杆钻具抗高温能力与国外存在差距;扭力冲击器等钻井提速工具在抗高温能力、可靠性、高密度钻井液适应性等方面与国外存在差距。

表 2 钻井提速配套关键技术国内外对标

Table 2 Comparison of key technologies for speeding up drilling at home and abroad

项目	中国	国外
钻头	复合片综合性能有待提升,8 000 m 以深钻头平均进尺为 120 m、平均工作寿命为 80 h 耐温为 150 °C	复合片材料及合成工艺成熟,8 000~10 000 m 超深硬地层进尺为 200 m、工作寿命为 120 h 耐温为 150~200 °C
垂直钻井系统	应用井眼尺寸为 $\Phi 311.1\sim 558.8$ mm( $12\frac{1}{4}\sim 22$ in)	应用井眼尺寸为 $\Phi 139.7\sim 711.2$ mm( $5\frac{1}{2}\sim 28$ in)
涡轮	涡轮功率小、效率低,耐温为 260 °C、寿命为 200 h,功率为 30 kW	涡轮功率大效率高,耐温为 260 °C,寿命为 300 h,功率为 50 kW
螺杆钻具	成熟定型 150 °C 高温螺杆钻具,研制出 175 °C 高温螺杆钻具,寿命在 200 h 以上	研制出全金属螺杆钻具,用于地热井和超深井钻井,抗温为 190 °C、寿命为 200 h
扭力冲击器	耐温为 175 °C,适应钻井液密度 $\leq 1.80$ g/cm <sup>3</sup>	规格品种齐全,综合性能优异,提速效果显著;耐温为 200 °C,寿命为 200 h 以上,适应密度 $\geq 2.0$ g/cm <sup>3</sup>
钻井优化提速系统	基于钻头破岩比能、井下振动、井眼清洁实时监测的钻井参数优化,提高机械钻速,减少井下复杂	融合井下测量与地面模型实现钻完井全过程多目标协同优化,减少井下复杂,提高机械钻速

### 1.4 钻井液

#### 1.4.1 国外概况

国外基础理论扎实,技术体系完善,抗高温油基、水基钻井液处理剂齐全、性能优良、质量稳定,高温高压环境下钻井液稳定性高,系列化产品实现规模应用。具备完善的超高温井壁稳定与润滑评价手段,试验装置耐温能力可达 300 °C,超高温条件下降摩减阻关键

材料不断攻关。防漏堵漏材料系列完善,并辅助相关数据库与软件系统,堵漏施工科学化水平高。

#### 1.4.2 中国概况

中国研发了多种抗高温高性能水基钻井液体系并实现规模化应用,抗高温油基钻井液体系基本成熟,具备规模化服务能力;超高温井壁稳定与润滑相关评价装置耐温 300 °C,缺少超高温降摩减阻关键材料;堵漏材

料类型日趋完善,堵漏施工成功率、科学性有待提高。

通过对标分析(表3),中国在水基、油基钻井液关键性能指标已达到国际先进水平,但水基钻井液抗高

温高盐关键处理剂、油基钻井液防漏堵漏及废弃物处理与国外还存在一定差距;超高温条件下井壁稳定与钻井液降摩减阻技术亟待开展攻关研究。

表3 钻井液关键性能技术指标国内外对标

Table 3 Comparison of key technical performance indicators of drilling fluid at home and abroad

项目	中国	国外
特深井高效钻井液	淡水基最高抗温为 240 ℃;油基最高抗温为 240 ℃,抗盐水侵为 45%,最高密度为 2.68 g/cm <sup>3</sup> ,沉降稳定性抗温 220 ℃达 10~15 d	淡水基最高抗温为 240 ℃,抗盐为 15%,抗 CaCl <sub>2</sub> 达 10 000 mg/L;油基最高抗温为 260 ℃,抗盐水侵为 20%~30%,最高密度为 2.59 g/cm <sup>3</sup> ,沉降稳定性抗温 220 ℃达 10~15 d
超高温高压稳定井壁与降摩减阻	水基最高抗温为 240 ℃,润滑系数约为 0.15;油基最高抗温为 260 ℃	水基最高抗温为 240 ℃,润滑系数约为 0.15;油基最高抗温为 260 ℃
特深裂缝性地层井漏防治	研发防漏堵漏大数据库,井漏智能预测及防漏堵漏辅助软件;研发随钻防漏、复合凝胶、交联成膜、可膨胀、固结等堵漏技术,堵漏材料类型多样	研发井漏预测软件并建立相应数据库,堵漏材料系统齐全,堵漏施工科学化水平高

## 1.5 固井技术

### 1.5.1 国外概况

国外超深井井下固井工具性能稳定、品种齐全,最高耐温耐压达 260 ℃/105 MPa,其中  $\Phi 244.5 \text{ mm} \times 177.8 \text{ mm}/139.7 \text{ mm}$  尾管悬挂器悬挂能力  $\geq 3\ 200 \text{ kN}$ 、耐温为 204 ℃、耐压为 103 MPa,顶部封隔压差为 86 MPa; $\Phi 139.7 \text{ mm}/127 \text{ mm}$  浮箍浮鞋耐温为 260 ℃,反向承压为 70 MPa; $\Phi 244.5 \text{ mm}$  大尺寸分级箍抗内压为 70 MPa、耐温为 232 ℃;超高压水泥头工作压力为 105 MPa,已研制适用于扩眼井段的井下启动类型套管扶正器,并已成功现场应用。抗高温高盐、高温大温差、高强度韧性、超长稠化时间膨胀管固井、遇气自愈合等适用于不同极端环境水泥浆体系成熟配套,规模化应用,最高抗温为 260 ℃,其中高温高盐水泥浆抗温为 260 ℃,密度为 1.40~2.88 g/cm<sup>3</sup>;高性能低摩阻水泥浆抗温为 200 ℃、流动性指数  $> 0.72$ 、48 h 抗压强度  $> 30 \text{ MPa}$ ;超长稠化时间膨胀管固井水泥浆稠化时间为 15~20 h、抗温为 150 ℃;高温大温差水泥浆抗温为 204 ℃、适用温差为 50 ℃,单次成功封固最长井段为 5 000 m;高强度韧性水泥浆抗压强度  $> 30 \text{ MPa}$ ,弹性模量小于 8 GPa。

固井作业过程仿真、优化设计及大数据分析等软件成熟配套。能够实现模拟管柱下入、套管扶正器优化设计、水泥石性能及寿命分析、注水泥设计与模拟、固井作业数据管理及大数据分析、初步智能化决策等功能。

### 1.5.2 中国概况

中国井下固井工具及配件最高耐温耐压达 240 ℃/70 MPa,其中  $\Phi 244.5 \text{ mm} \times 177.8 \text{ mm}/139.7 \text{ mm}$  尾管悬挂器悬挂能力  $\geq 2\ 000 \text{ kN}$ ,耐温为 204 ℃,耐压为 70 MPa,顶部封隔压差为 70 MPa; $\Phi 139.7 \text{ mm}/127 \text{ mm}$  浮箍浮鞋耐温为 240 ℃,耐冲蚀时间为 48 h,反向承压为 35 MPa; $\Phi 244.5 \text{ mm}$  大尺寸分级箍抗内压为 50 MPa,耐

温为 180 ℃;超高压水泥头工作压力为 70 MPa,但未见扩眼井用配套套管扶正器的报道。

中国已研发抗高温大温差、高强度韧性、低密度高强度等系列化水泥浆、固井外加剂、高效冲洗隔离液等产品,水泥浆密度为 1.20~2.60 g/cm<sup>3</sup>,最高抗温为 240 ℃,其中,高温高盐水泥浆抗温为 240 ℃,密度为 1.50~2.60 g/cm<sup>3</sup>;高性能低摩阻水泥浆抗温 180 ℃、流动性指数  $< 0.65$ 、48 h 抗压强度  $> 24 \text{ MPa}$ ;超长稠化时间膨胀管固井水泥浆稠化时间为 8~13 h、抗温为 90 ℃;高温大温差水泥浆抗温为 200 ℃、适用温差为 100 ℃,单次成功封固最长井段为 7 000 m;高强度韧性水泥浆抗压强度  $> 40 \text{ MPa}$ ,弹性模量小于 8 GPa;低密度高强度水泥浆密度为 1.20~1.60 g/cm<sup>3</sup>,水泥石抗压强度为 14 MPa。

通过研发 AnyCem<sup>®</sup> 自动化固井装备及配套软件实现软硬件一体化交互,软件具备注水泥液柱优化设计与分析、施工过程设计与模拟、套管强度校核及扶正器优化设计、下套管摩阻系数分析校核等功能,实现了成熟配套规模化应用。

通过对标分析,中国在超深井井下固井工具抗温、承压、耐冲蚀性方面距离国外还存在一定差距;水泥浆体系及材料整体达到国际先进水平,大温差、高强度韧性及低密度高强度水泥浆性能部分优于国外;固井自动化处于国际领先水平,但大数据、智能化固井软件与国外存在差距。

## 1.6 随钻测控技术与装备

### 1.6.1 国外概况

国外常温常压、高温高压环境下 MWD、LWD 及旋转导向等已产品化、系列化规模应用,最高抗温为 200 ℃,部分突破 230 ℃并实现超高温高压环境成功应用(表4),机械式测斜仪应用于特高温高压环境,EMWD、智能钻杆、随钻工程参数测量、随钻地质导向、随钻前探工具等成熟配套。

### 1.6.2 中国概况

中国常温常压 MWD、LWD、近钻头地质导向等实现规模化应用,已完成国产旋转导向研发与应用,抗温为 150℃,研发 EMWD、智能化钻杆、井下工程参数测量短节、机械式偏重感应随钻测斜系统等工具,处于现场试验阶段。

通过技术对标,中国在高温高压、超高温高压环境随钻测控技术与装备与国外差距明显,亟需开展抗高温电子元器件攻关与研究。

## 1.7 试油完井技术

### 1.7.1 国外概况

国外试油完井工艺设计主要采用 Wellcat 等成熟商用软件模块,已形成 8 000~10 000 m 特深连续管装备及配套

工具与技术,高温高压试油测试工具整体耐温耐压差为 204℃/105 MPa,试油完井工具整体耐温耐压为 230℃/140 MPa,抗高温高压试油完井工具系列化成熟配套。

### 1.7.2 中国概况

中国已形成独具特色高温高压井管柱力学设计软件,形成 7 000~8 000 m 特深连续管装备及配套工具与技术,高温高压测试工具整体耐温耐压差能力达到 204℃/105 MPa,高温高压试油测试工具逐步实现国产化替代,高端试油完井工具在持续开展攻关。

通过对标分析(表 5),中国连续管作业极限与国外存在一定差距,完井流体、试油完井工具抗温、抗压能力与国外存在一定差距。

表 4 国外高温高压、超高温高压环境随钻测控装备

Table 4 Overseas MWD/LWD, RSS operated under high temperature and pressure, ultra-high temperature and pressure

项目	高温高压	超高温高压
随钻测量	哈里伯顿公司 QBAT 多磁极随钻声波(175℃)	哈里伯顿公司随钻测压 HSFT(232℃/207 MPa) 贝克休斯公司 Nautilus Ultra(232℃/207 MPa)
	APS 公司 Sure shot MWD (175℃/210 MPa)	
	斯伦贝谢公司 TeleScope ICE MWD(200℃/207 MPa) 哈里伯顿公司 Quasar Pluse™ MWD(200℃/207 MPa)	
旋转导向	斯伦贝谢公司 AutoTrak G3(175℃/207 MPa)	
	哈里伯顿公司 Geo-Pilot Duro (175℃/207 MPa)	
	斯伦贝谢公司 PowerDrive ICE(200℃/207 MPa)	

表 5 试油完井关键技术国内外对标

Table 5 Comparison of key technologies for well testing and completion at home and abroad

项目	中国	国外
特深井试油完井管柱校核软件	多家单位形成各具特色的管柱力学校核软件,尚未形成商业化品牌能力	以哈里伯顿公司 Landmark 软件 Wellcat 模块为代表,实现管柱力学校核及全生命周期管柱力学模拟计算,具有较大的行业影响力
特深试油完井工具	试油测试工具及地面流程:工具在 204℃/105 MPa 基本成熟;地面流程实现 175 MPa 作业能力,居于国际领先水平;完井工具为 230℃/105 MPa,与国外有较大差距	试油测试工具及地面流程:工具在 204℃/105 MPa 成熟应用;地面流程实现 140 MPa 作业能力,完井封隔器为 232℃/140 MPa,成熟应用
特深连续管装备	作业用注入头最大提升力为 680 kN 滚筒最大容量为 $\Phi 60.3 \text{ mm}(2\frac{3}{8} \text{ in}) \times 8\,000 \text{ mm}$ 防喷系统额定压力为 105 MPa 电液控制系统可实现遇阻停机 连续管 CT130 最长为 7 000 m	作业用注入头最大提升力为 630 kN 滚筒最大容量 $\Phi 60.3 \text{ mm}(2\frac{3}{8} \text{ in}) \times 8\,700 \text{ m}$ 防喷系统额定压力为 175 MPa 电液控制系统可实现自动控制 连续管 CT140 最长为 10 000 m
特深连续管分层气举、测试	气举测试作业深度为 7 000 m 测试系统抗温 150℃、承压 70 MPa 存储式测试数据为主 光缆连续管长度 6 600 m 压力测试精度 $\pm 2\%$	气举测试作业深度为 10 000 m 测试系统抗温为 240℃、承压为 150 MPa 数据实时传输+井下存储 光缆连续管长度为 10 000 m 压力测试精度为 $\pm 1\%$
完井流体	低固相完井液抗温 200℃、密度 $\geq 1.80 \text{ g/cm}^3$	低固相完井液抗温为 230℃、密度 $\geq 2.0 \text{ g/cm}^3$

## 2 中国深层—超深层钻完井关键技术及其应用效果

针对深层—超深层油气钻完井工程难题,重点围绕新装备、新工具、新材料、新软件等利器持续开展共性、特色、关键、储备技术攻关与研究。2000 年以来,中国深井、超深井钻完井技术与装备先后经历加快技术攻关、关键技术突破、全面自主创新 3 个阶段, ZJ120/9000DB 自动化钻机、全过程精细控压、井身结

构优化与拓展、大管径/高钢级膨胀管、高效 PDC 钻头、高温长寿命螺杆、超高温钻井液及防漏堵漏、高强度韧性水泥浆与自动化固井、高温高压试油完井工具、超深连续管装备、钻完井工程设计与优化决策一体化软件等一批关键核心技术持续突破,配套技术的集成与应用突破超深、超高温、超高压、纵向压力系统复杂、安全密度窗口窄、地层可钻性差等技术难题,助力红星 1 井(中国首口八开八完超深井)、蓬深 6 井(亚洲最深直井)、果勒 3C 井(亚洲最深水平井)、双鱼 001-H6

井、满深71井、天湾1井、柴探1井等一批指标井、疑难井成功钻成,支撑了中国由钻井大国迈向钻井强国行列。

### 2.1 深井、超深井关键钻井装备

实现7000~12000 m超深井钻机系列配套并全面进入国际市场,其中具备自主知识产权的7000 m自动化钻机核心部件实现国产化,独创研发8000/9000 m四单根立柱钻机突破钻井管柱稳定作业长度极限(38 m),在塔里木油田应用施工井段提速超过20%,复杂事故时效降低75%<sup>[7]</sup>。52 MPa高压钻井泵成熟并规模应用,70 MPa高压钻井泵取得突破。研制了8种规格、20余种型号全系列钻井、修井用顶驱,配套黏滑振动抑制、扭摆减阻等多种提升钻完井作业安全及效率特色技术,满足3000~12000 m陆地、海洋、低温地区等全系列钻机定制化需求。中国深地川科1井、深地塔科1井两口万米特深井目前配备12000 m钻机、70 MPa高压钻井泵、DQ-120系列顶驱钻进。

### 2.2 精细控压钻完井技术

针对深井、特殊复杂井窄压力窗口“溢漏共存”难题,中国石油天然气集团有限公司研制出PCDS-I、II、S等系列精细控压钻井系统,构建钻前压力预测+回压设计、随钻压力监测+回压调控、钻后压力分析+控压评价的控压钻完井技术,实现了“钻一测一固一完”全过程精细控压,井口控压能力最高为12.5 MPa、井底压力控制精度为 $\pm 0.2$  MPa。2022年,系统在中国复杂地层应用11井次,实现钻井液漏失量、复杂处理时间降低70%以上,固井质量合格率提高10%以上<sup>[9]</sup>。该系统已在塔里木、四川、新疆南缘、青海等12个油气田现场应用500余井次,助力高探1井等一大批重点井取得重大勘探突破,有效保证了塔里木、四川、准噶尔南缘等地区超深井的井控安全,大幅提高作业效率,引领中国控压钻井技术发展。

### 2.3 井身结构优化设计与拓展技术

针对超深层钻井地质环境因素存在不确定性问题,建立了井-震一体化地层压力预测及钻井工程风险识别方法,实现了基于地震数据及测井资料结合的区域地质体裂缝、断层、溶洞等信息三维可视化,预测井漏、井壁坍塌等风险,优化地层压力剖面及井身结构设计<sup>[21-23]</sup>。结合地层压力可信度表征、钻井工程风险概率评估及风险类别识别方法,形成包含地层信息不确定性量化描述、含可信度安全密度窗口的基于风险预测井身结构优化技术<sup>[24]</sup>。针对多套断层、多套盐层、多套压力系统等复杂地质条件下井身结构层次拓展难题,通过优化钻头-套管尺寸系列,研发井身结构拓展装备,形成了非标系列套管、随钻扩眼和膨胀管等

井身结构拓展技术,支撑形成“三开三完”至“七开七完”多套井身结构方案,在四川盆地深层、塔里木盆地库车山前、准噶尔盆地南缘、柴达木盆地等地区的复杂超深井成熟应用<sup>[7,25-28]</sup>,目前中国井身结构最高可实现“八开八完”。

研制并试验定型N80、P110钢级膨胀管工具,形成了适用于 $\Phi 149.2\sim 333.4$  mm井眼的8种规格系列化产品,N80钢级膨胀管胀前屈服强度最高为393 MPa,抗拉强度最高为558 MPa,P110钢级膨胀管胀前屈服强度最高为587 MPa,抗拉强度最高为748 MPa,膨胀管胀后冲击韧性 $>150$  J,可提高地层承压能力达35 MPa以上。该项技术在川渝、塔里木、乍得等国内外6个油田和地区推广应用,有效解决了恶性漏失封堵、老井修复、井筒重构难题。针对西南油气田足203H5-8井三开 $\Phi 311.2$  mm井眼须家河组—嘉陵江组三段地层裂缝、孔洞发育,地层承压能力不足,多次发生失返性漏失难题,采用 $\Phi 299$  mm膨胀管对该井须家河组—嘉陵江组三段低压层进行裸眼封堵作业,封堵施工作业长度为828.14 m,膨胀管内径为284 mm,有效解决了常规化学堵漏耗时近5个月无法奏效的难题,满足后续 $\Phi 282.6$  mm钻头钻进及中完作业。2023年, $\Phi 219\times 12$  mm高性能膨胀管在华北油田隆华1井成功实施裸眼封堵作业838 m,膨胀管下深为6080 m,井底温度为145℃,钻井液密度大于 $1.93$  g/cm<sup>3</sup>,刷新了中国膨胀管封堵作业长度、应用深度与温度3项纪录。

### 2.4 钻井提速配套技术

针对深部强研磨难钻地层,形成7 GPa以上超高压、超硬材料合成工艺并研制出高性能复合片,设计了凸脊型、低后倾角型、大曲率型、凹型4种高效非平面齿PDC钻头,形成从复合片材料、设计、合成研发到PDC钻头设计、加工、制造一体化流程<sup>[29]</sup>。系列钻头在塔里木、川渝深层等地区的难钻地层应用39井次,平均提速46.5%,平均进尺提高136.7%,使塔里木油田恰探1井进尺提高8倍以上<sup>[9]</sup>。西南油气田双探107井吴家坪组岩性为含燧石硅质、黄铁矿强研磨灰岩,非平面齿PDC钻头实现趟钻进尺为57.47 m,平均机械钻速为2.36 m/h,同比邻井提高119%、162%。2023年1月,国产超硬耐研磨PDC钻头、非平面齿PDC钻头在塔里木油田果勒3C井实现9000 m以深一趟钻进尺超200 m、平均机械钻速为3.05 m/h,创国产钻头9000 m以深最高纪录。

研制成功适用于 $\Phi 311.1\sim 558.8$  mm( $12\frac{1}{4}\sim 22$  in)井眼BH-VDT垂直钻井系统,系统最高抗温为150℃,最大工作压力为140 MPa,井斜控制精度小于1°,在塔里木、青海、新疆、渤海湾等油田应用近百井次,创单趟

钻入井时间 396 h、单趟钻进尺 2 047 m 等多项记录。突破高性能橡胶材料配方和成型制造工艺,研发适用于油基、水基等多种钻井液体系的抗高温、长寿命大扭矩螺杆钻具,抗温为 175 ℃,寿命为 200 h 以上,现场应用 100 余井次,在塔里木油田塔中 862H 井最大应用井深超过 8 000 m,一趟钻进尺为 653 m,井底温度为 140 ℃,井下工作时间达到 236 h。研制液动旋冲工具、扭力冲击器、水力振荡器、岩屑床清除工具、钻柱减阻器等多种提速配套工具实现产品化、系列化,在塔里木、新疆、四川、大庆、吉林等地区进行现场应用百余井次,平均机械钻速提高 20% 以上。

新疆油田呼 6 井超深井采用 ZJ90 钻机并配备 2 台 HH2400 型五缸泥浆泵、1 台 F-2200HL 型泥浆泵,二开、三开使用“垂直钻井系统+大扭矩螺杆+强化钻井参数”钻进,兼顾钻井参数强化与井身质量控制需求,钻井提速效果明显,二开井段平均机械钻速为 8.75 m/h,较邻井呼探 1 井提高 137.8%,三开实现“一趟钻”进尺为 984 m,平均机械钻速为 8.64 m/h,较邻

井呼探 1 井提高了 106.7%,该井完钻井深为 7 280 m,钻井周期为 197 d,较设计钻井周期节省 92 d,较邻井呼探 1 井节省了 291 d。塔里木油田库车山前砾石层推广应用“大扭矩螺杆+垂直钻井系统+高抗冲击多棱齿 PDC 钻头”组合,提速 16 井次,与区块邻井相比提速效果明显,进尺和机械钻速同比提高 50%~300%,其中博孜 2402 井实钻钻井周期为 303.9 d,较博孜 1 区块最快钻井周期缩短 34 d。

## 2.5 高性能钻井液及井漏防治技术

针对深井、超深井中钻井液沉降稳定性及流变性维护难题,探索了高温高压高盐环境下钻井液流变、沉降、老化<sup>[30]</sup>等性能变化规律,自主研发有机土、主/辅乳化剂、降滤失剂和纳米封堵剂等核心处理剂,形成成膜化学固壁、胺基钻井液、抗高温抗盐环保水基钻井液、可解堵型保护储层钻井液、抗高温强封堵油基钻井液等 6 大类钻井液体系<sup>[31-34]</sup>,有力支撑了四川、塔里木、准噶尔、柴达木等盆地超深油气资源勘探发现(表 6)。

表 6 中国陆上典型超深井使用钻井液类型及效果

Table 6 Types and effects of drilling fluids used in typical ultra-deep wells on land in China

井号	井深/m	温度/℃	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	钻井液类型及使用效果
双鱼 001-H6	9 010	176	1.40~1.45	油基钻井液,川渝地区井深最深纪录
双鱼 001-X7	8 468	163	1.20~1.43	油基钻井液
红星 1	7 779	160	1.65~2.20	油基钻井液,中国第 1 口八开八完井
蓬深 6	9 026	180	1.40~1.45	油基钻井液,蓬莱区块灯影组最深取心
天安 1	8 140	169	2.30	油基钻井液,新疆油田首口六开井
天湾 1	8 166	172	2.24	油基钻井液,准噶尔盆地最深井
千探 2	6 006	200	1.27	无固相水基钻井液,井内 H <sub>2</sub> S 浓度为 1 000×10 <sup>-6</sup>

高温水基钻井液抗温为 240 ℃,密度最高为 2.40 g/cm<sup>3</sup>,支撑井底温度为 235 ℃的碱探 1 井顺利完钻,有效降低了复杂地层钻进过程中的井壁失稳机率,该体系钻井液现场应用达 160 余口井;欠饱和盐水钻井液体系抗温为 200 ℃,密度最高为 2.40 g/cm<sup>3</sup>,实现了盐膏层钻穿成功率 100%,盐膏层实际井径扩大率≤10%,有效解决了塔河油田深部盐膏层钻井难题<sup>[7]</sup>。

抗高温强封堵油基钻井液抗温 240 ℃,钻井液最高密度 2.68 g/cm<sup>3</sup>(乐探 1 井),盐水侵容量限大于 45%,该体系高温高密度条件下稳定性高,在克深 21 井(井深为 8 098 m,钻井液密度为 2.58 g/cm<sup>3</sup>,井底温度为 186 ℃)、达深 1 井(井底温度为 197 ℃)等 20 多口超深井中成功应用,其中,克深 21 井四开 7 662 m 附近深层盐间遭遇溢-漏同层,通过 15 次控压排出超过 100 m<sup>3</sup> 高压盐水,污染油基钻井液体积达 1 700 m<sup>3</sup>,钻井液密度从 2.53 g/cm<sup>3</sup> 降至 2.46 g/cm<sup>3</sup> 后成功恢复钻进,完钻后测井、下套管和固井作业时间长达 42 d,实现了

测井一次成功完成,套管顺利下入。

研发基于地震属性体、岩性、测井、录井、钻井等数据的防漏堵漏大数据库,井漏智能预测及防漏堵漏辅助决策专家系统<sup>[35]</sup>,系统针对库车山前漏层深度、漏速预测准确率高达 90%、缝宽预测符合率达到 85%,实现堵漏技术由经验迈向科学化、智能化。研制了智能凝胶<sup>[36]</sup>、井下交联、柔性自适应、可控膨胀凝胶等堵漏材料。针对裂缝性地层造成的恶性漏失,中国石油工程院攻关形成含井漏预测预警与决策系统 Fracseal V1.0、温压响应型堵漏材料 DRWm 以及低密度高强度水泥浆为一体的防漏堵漏技术,温压响应型堵漏材料 DRWm 抗返吐强,适用温度范围为 50~180 ℃,2~4 mm 楔形缝板正反向承压≥15 MPa,该技术在冀东、新疆、青海等油田的裂缝性地层成功应用 10 余井次,可大幅度提高一次堵漏成功率。同时,大管径高钢度膨胀管的突破实现深井、超深井恶性漏失井段在不改变原有井身结构的情况下顺利钻进和中完,大幅度提高应对恶性复杂井漏的能力。



## 2.6 固井技术

针对深井、超深井“盐层、高温、易漏、腐蚀、地热、高压”等复杂工况,攻关研发高温缓凝、抗高温高盐降失水等核心外加剂,形成抗高温高盐、抗高温大温差、高强度韧性、低密度高强度、超高温磷酸盐、预防酸性气体腐蚀等水泥浆体系,有效解决了深层—超深层三高井、储气库井、窄密度窗口等固井难题<sup>[37-39]</sup>。

中国石油工程院研制抗高温水泥浆耐温为 240℃,水泥石强度大于 40 MPa,稠化时间为 200~600 min 可调,支撑大港油田千探 1 井  $\Phi 139.7$  mm 尾管成功固井,固井最大井深为 6 070 m、井底最高温度为 213℃;高强度低密度水泥浆密度为 1.20~1.60 g/cm<sup>3</sup>,水泥石抗压强度 >14 MPa,强度指标比肩常规密度水泥,在西南油气田鹰探 1 井使用 1.20 g/cm<sup>3</sup> 低密度水泥浆成功完成尾管固井;高温大温差水泥浆抗温为 200℃、适用最大温差为 100℃,具备 7 000 m 裸眼段一次上返固井作业能力,在塔里木油田哈 10-7 井成功实现一次封固 6 657 m 及温差 125℃的世界纪录<sup>[7]</sup>,在西南油气田蓬深 6 井实现最大井深 6 418 m、3 510.98 m 裸眼段一次上返封固固井。防腐蚀水泥浆体系在西南油气田铁山坡高含硫气井中成功应用,技术套管平均固井质量合格率达到 97%,助力中国石油天然气集团有限公司首个自主开发的高含硫气田的高质量建设。以超高温水泥浆、精细控压/平衡压力固井工艺等为核心的成套固井技术保障了中国首口八开八完井——四川盆地红星 1 井、准噶尔盆地南缘第一深井——天湾 1 井等一批深井、超深井固成、固好,其中,西南油气田蓬深 6 井(井深为 9 026 m)创亚洲最深直井固井纪录。

国产化关键固井工具及配件性能稳定,中国石油集团川庆钻探工程有限公司研制的  $\Phi 244.5$  mm  $\times$   $\Phi 177.8$  mm 顶部封隔式尾管悬挂器耐温为 175℃,耐压差为 70 MPa,已在川渝、塔里木地区规模应用 100 余口井;德州大陆架石油工程技术有限公司研制深井重载型、高温高压气密封等系列尾管悬挂器耐温为 204℃,耐压差为 70 MPa,研制封隔式分级注水泥器封隔压差达 35 MPa 以上,已在塔里木油田规模应用 100 余井次,成功解决了塔里木盆地二叠系漏失层造成技术套管固井大段空套管问题。

融合固井工程科学化设计软件平台和自动化连续精准作业成套装备,中国石油工程院成功研制了 Any-Cem<sup>®</sup> 自动化固井技术与装备,有效解决了先进固井软件依赖进口、分析模拟不充分、装备自动监控水平低等技术难题,全面提升科学设计模拟、装备自动监控与大数据分析能力,提高了固井信息化管理水平,在国际上首次实现软硬件一体化交互全流程“无人操作”自动

化陆上固井作业,是提高固井工程质量和管能、保障井筒资产优良率的工程利器,目前该系统已在 16 家油气和钻探公司安装 200 多套,应用近 10 000 井次,引领了固井技术自动化发展。

## 2.7 试油测试及储层改造技术

研发了高温高压井管柱力学设计软件,具有管柱下入过程动态模拟分析、完井管柱多工况模拟分析、射孔爆裂响应模拟分析、减震器性能模拟分析等功能。高温高压测试工具整体耐温耐压差能力提升至 204℃/105 MPa,配套形成深层—超深层测试-联作技术,创新形成抗高温 200℃钻通刮铣“七合一”一体化井下作业提速工具,实现一趟管柱完成钻塞、通井、刮壁等作业,该工具在新疆、西南等油气田完成 20 井次试验,将 9 趟井筒清洁作业优化为 4 趟,实现井筒准备作业周期从 40.7 d 降为约 25 d,提升作业效率近 40%。

形成深层—超深层储层复杂缝网地质工程一体化设计技术,实现了改造缝网面积和波及体积定量模拟,持续提升压裂方案设计质量。研发形成 200℃土酸和减阻酸、230℃超级缓速酸和高温压裂液等高温高压安全高效储层改造工作液,其中,200℃土酸在青海油田昆-101 井、柴探-1 井等成功应用,昆 101 井井底温度为 205℃,抗高温土酸井下工作时间 24 h 后井筒完整性良好,未发生工具和管柱腐蚀,230℃高温压裂液在青海油田昆 2-X1 井成功应用,创多项中国作业指标记录。

## 2.8 连续管系列装备与技术

研制出符合中国道路运输要求的大型自走式连续管作业机,最大容量达到  $\Phi 50.8$  mm (2 in)  $\times$  8 100 m [ $\Phi 44.5$  mm ( $1\frac{3}{4}$  in)  $\times$  9 250 m],目前已推广应用 15 台套,开发  $\Phi 50.8$  mm +  $\Phi 44.5$  mm +  $\Phi 38.1$  mm (2 in +  $1\frac{3}{4}$  in +  $1\frac{1}{2}$  in) 等多种管径连续管现场对接加长的组合连续管作业技术,已作业 5 口井,复合管柱有效降低作业摩阻实现顺利穿过完井管柱缩径井段。形成深井、超深井连续管+气举阀气举排水采气、连续管电缆加热防蜡采油等完井技术,连续管钻磨、射流解堵等复产技术,连续管输送射孔、压裂、酸化等增产技术、连续管钻磨安全阀、切割、打捞等复杂处理技术配套工具及工艺,并在塔里木油田等得到广泛应用。

成功研制耐温 >260℃、外径为  $\Phi 54$  mm、 $\Phi 73$  mm 连续管用全金属涡轮钻具,5~10 kN 低钻压下工作转速由 200 r/min 提升至 2 000 r/min,机械钻速同比提升 12 倍;针对深井高围压下射流解堵难题,研制 200℃/105 MPa 连续管钻磨/射流作业工具,射流解堵工具实现  $\Phi 38$ ~73 mm 内部旋流、外部涡旋、喷头旋转式工具全系列配套,成功攻克 8 000 m 级超深小井筒解堵世界级难题,实现超深井连续管作业高端工具全面自主配

套,系列工具在塔里木油田库车山前成功应用 15 井次,最大作业井深为 7700 m,最高作业泵压为 82 MPa,最高井底压力为 134 MPa,最高井底温度为 171 °C,射流解堵成功率高达 100%,复产成效明显,射流解堵后最大增油量为 80.76 t/d、最大增气量为  $4.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

## 2.9 数字化、信息化技术

基于深井、超深井、复杂结构井风险控制和降本增效需求,研发形成钻完井工程设计与优化决策一体化软件 SmartDrilling V1.0,集成钻完井工程设计、IDAS 钻井优化、随钻地质导向、AnyCem® 自动化固井等多款软件模块,实现钻井工程设计与分析、钻井风险预警与决策实时优化,提升深井、超深井钻井设计与施工科学性,降低钻完井作业风险。系统在 5 家钻探企业和 3 家油气田企业推广 120 余台套,应用 610 井次,为深井、超深井安全优快钻井提供了科学设计与优化手段。

结合计算机技术、高性能图形工作站、物联网、大数据、云计算等信息技术构建 EISC(工程作业智能支持中心)系统,搭载钻井优化设计、数值模拟仿真等工程软件,融合地面数据、井下随钻测量数据、后台支撑数据(邻井资料等),实现“远程监控、钻井参数实时优化、井控和事故复杂风险预警、专家远程支持、辅助决策”等功能,形成“专家集中决策+指令直达现场+一线精准执行”的闭环管理模式,提升作业效率,带动钻完井作业、工程技术管理模式向信息化、智能化转变,助力钻井提质增效。

## 3 中国深层—超深层面临的问题及发展建议

### 3.1 面临问题与挑战

随着油气勘探开发目标不断向超深层迈进,面临埋藏深、层位多、压力窗口窄、高陡构造、巨厚砾石层、盐膏层等愈加复杂的地层条件,超高温、超高压、高地应力、强腐蚀流体等更加极端的井筒环境,井身结构层次不够用,井漏、井壁垮塌、卡钻等事故复杂频发,深部地层研磨性强导致机械钻速慢、钻井周期长,同时随井深增加,钻遇断层、过渡带破碎层、高压盐水、 $\text{H}_2\text{S}$  等地质不确定性增大,导致有些井难以钻达目的层,甚至不能实现地质目标。如四川盆地红星 1 井地层出现倒转 5 次,青海油田翼探 1 井地层重复导致目的层埋深增加 1000 m 等复杂难题。

具体面临的问题有:

(1) 超深、复杂多压力系统的钻井风险大,现有井身结构不能完全满足要求。随着油气勘探目标向 9000~10000 m 超深层迈进,层位多,地层压力系统复杂,窄密度甚至负密度压力窗口,如塔里木盆地克深区块压力窗口为  $0.01 \sim 0.02 \text{ g/cm}^3$ ,四川盆地高石梯地

区灯影组压力窗口为  $-0.10 \sim -0.06 \text{ g/cm}^3$ ,青海柴达木盆地狮 70 井压力窗口  $0.06 \text{ g/cm}^3$ ,易导致井身结构层次不够、井漏频发、井控风险大、固井质量难以保障,叠加断层、过渡带破碎层、膏盐层、高压盐水、 $\text{H}_2\text{S}$  等复杂地层条件,存在多个必封点和风险点,现有井身结构无法完全满足更深层钻探和完井改造要求。

(2) 特高温高压环境下,井筒工作液适应性、井下提速及测控工具稳定性难以保障。深井、超深井面临井底温度大于 200 °C、压力超过 175 MPa,青海油田碱探 1 井实测井底温度为 235 °C、翼探 1 井实测井底温度为 240 °C,准噶尔南缘天湾 1 井测试储层压力为 171 MPa,超高温高压环境下井筒钻井液、水泥浆等流体性能难以控制,易诱发钻井液降失水剂、水泥浆缓凝剂等材料失效。现有国产井下马达、扭力冲击器等提速工具最高耐温为 175 °C、随钻测量工具耐温为 150 °C、尾管悬挂器耐温 204 °C/密封压力为 70 MPa,200 °C 以上高温下螺杆定子弹性体橡胶材料、扭力冲击器密封件易膨胀老化失效,随钻测控、尾管悬挂器等工具仪器因耐温不足出现高温失效。

(3) 超长钻杆/套管重量大,常规钢质管柱强度不足,失效风险高。深井、超深井中超长钻杆、套管柱超重问题突出,常规钢质钻杆安全许用下深受限,管柱强度难以满足安全下入、钻遇复杂后安全上提下放需求。同时深部泥岩、高压盐膏层等特殊地层中地层压力大,套管柱变形、挤毁、破裂风险高。

(4) 超深地层岩石可钻性差,超长井段机械/水力能量传递效率低,钻井提速挑战大。深部地层岩石压实程度高、研磨性强、可钻性差,超长井段管柱摩阻、水力能量耗散大,地面水力与机械能量传递困难,导致钻头破岩能量不足、提速手段少、机械钻速慢,钻井周期长,工程投资大。

(5) 超高温高压极端工况下,安全快速试油完井难以有效保障。超深层中超高温高压且含腐蚀性流体环境下,小尺寸井眼中试油完井超过现有工具的极限,当前射孔爆轰等管柱动力学核方法、高温高密度试油工作液、测试工具、完井工具难以满足超高温特高压作业工况,体系与工具优选困难(表 7)。

### 3.2 发展建议

由于深部地层超深、超高温、超高压、高应力带来许多科学问题、工程难题尚未解决,要实现安全优快钻完井,保障深井、超深井、特深井实现地质目标,面对许多新形势和新挑战,需要发展多学科跨专业综合一体的技术才能解决日益复杂的深层油气勘探开发工程技术难题,围绕上述问题与挑战,对深层—超深层钻完井技术发展提出了一些建议。

表7 中国超深油气井试油测试面临“一深、四高、一小”难题

Table 7 Problem of “deep buried depth, high temperature, high pressure, high geo-stress and high steep structure, and small borehole size” faced in oil test of ultra-deep hydrocarbon wells in China

地区	最大井深/ m	最大储层 深度/m	最高温度/ C	最高地层 压力/MPa	最高压力 系数	最大 H <sub>2</sub> S 浓度/10 <sup>-6</sup>	最大 CO <sub>2</sub> 浓度/10 <sup>-6</sup>	完井尺寸/cm
塔里木油田	9396	8743	190	172	2.26	457000	273000	13.97 cm 为主, 部分 12.70 cm
青海油田	7310	7283	240	112	2.25	53000	50000	12.7 cm 及 13.97 cm
西南油气田	9026	8060	216	151	2.26	49695	70407	12.7 cm 为主, 最小 11.43 cm
新疆油田	8092	8006~8092	170	171	2.37			17.78 cm 及 13.97 cm

具体建议有:

(1) 加大超深层抗高温高压钻机配套装备能力、自动化智能化水平研发力度, 研制 15000 m 智能钻机, 研发 175 MPa 及以上特高压井口及配套装备, 保障超深层油气勘探开发钻井安全。

(2) 加强地质工程一体化、深化复杂地层压力系统研究, 综合利用测井、地震、地质资料及室内试验手段, 采用井-震结合方式, 建立深层—超深层裂缝断层、地应力、地层压力展布等三维地质力学模型, 优化安全钻井液密度窗口, 预测复杂地层漏失及垮塌风险, 指导安全高效钻井。

(3) 采用钻井—完井—试油一体化设计理念, 依据合理的“套管—井眼”间隙, 持续优化和拓展井身结构。加强高效随钻扩眼工具、P110 高钢级膨胀管系列化研究, 拓展套管层次, 为井身结构优化及拓展提供关键技术保障, 并配套相应钻完井工具。

(4) 攻关超高温高压井下工具仪器, 突破抗高温测量控制电路、高温传感器、耐高压材料、高可靠机电工艺等多项卡点技术, 研制耐温 200 °C MWD 及垂直钻井系统、230 °C/105 MPa 测试及完井系列化试油测试关键工具, 研发高强度低密度钻杆、高钢级抗硫套管等管材。

(5) 攻克抗超高温高盐井筒工作液关键材料、超高温评价方法等瓶颈技术, 构建性能稳定、抗温 240 °C 以上钻井液及水泥浆体系; 突破低摩阻、抗特高温流动稳定性、抗污染腐蚀等关键技术, 形成特高温、无固相高密度、低腐蚀试油工作液体系。

(6) 升级深层—超深层配套提速工具, 探索超深、超高温高压地层破岩机理, 攻关超硬耐磨、高效破岩长寿命钻头, 耐 200 °C 高温螺杆、耐高温高密度钻井液扭力冲击器和井底减振增能工具等钻井提速工具。

(7) 加快数字化转型、智能化发展, 打造人工智能应用场景, 建立大数据、云计算、人工智能等信息技术与传统钻完井工程技术深度融合新模式, 完善远程决策支持技术, 加快向智慧工程、智能技术转型发展。研制钻井智能决策与优化控制系统、智能钻机与智能化井下工具, 大幅度提高钻完井效率, 助力高效钻完井<sup>[40]</sup>。

## 4 结论及建议

(1) “钻头不到, 油气不冒”, 打造安全高效深井、超深井钻完井技术体系, 支撑深层—超深层油气资源高效勘探与效益开发, 对于助力中国油气资源增储上产、保障国家能源安全意义重大。

(2) 近年来, 中国深井、超深井钻完井技术取得重大进展, 形成了以万米级自动化钻机、非常规井身结构优化拓展、钻一测一固一完全过程精细控压、以水泥环密封完整性为核心的固井成套技术、大尺寸高钢级膨胀管、高效 PDC 钻头、抗高温高压井筒工作液、8000 m 以深连续管作业装备与工具、超高温特高压试油完井技术等为核心的深井、超深井钻完井关键技术, 有力支撑了深层—超深层油气资源勘探开发。

(3) 随着勘探的持续深入、井深的增加, 复杂地质条件和极端井筒环境为深井、超深井打好、打快、打优带来极大挑战, 建议进一步开展超深层钻井装备、井身结构优化和拓展、超高温高压井下工具仪器等关键核心技术攻关与升级迭代, 发展多学科跨专业综合一体化技术以解决日益复杂的深层油气勘探开发工程技术难题, 加强国内外油公司、油田技术服务公司、高等院校、科研院所之间交流合作, 不断突破钻完井关键核心技术, 支撑中国深层—超深层油气勘探开发迈上新台阶。

## 参 考 文 献

- [1] 王兆明, 温志新, 贺正军, 等. 全球近 10 年油气勘探新进展特点与启示[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(2): 27-37.  
WANG Zhaoming, WEN Zhixin, HE Zhengjun, et al. Characteristics and enlightenment of new progress in global oil and gas exploration in recent ten years[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(2): 27-37.
- [2] 赵文智, 窦立荣. 中国陆上剩余油气资源潜力及其分布和勘探对策[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(1): 1-5.  
ZHAO Wenzhi, DOU Lirong. Potential, distribution and exploration strategy of petroleum resources remained onshore China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(1): 1-5.
- [3] 唐玮, 张国生, 徐鹏. “十四五”油气勘探开发科技创新重点领域与方向[J]. 石油科技论坛, 2022, 41(5): 7-15.

- TANG Wei, ZHANG Guosheng, XU Peng. Analyze key areas and orientations of technological innovation for oil and gas exploration and development in 14th five-year plan period[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2022, 41(5): 7-15.
- [4] 杨金华, 张焕芝. 非常规、深层、海洋油气勘探开发技术展望[J]. 世界石油工业, 2020, 27(6): 20-26.
- YANG Jinhua, ZHANG Huanzhi. Outlook on the exploration and development technologies of unconventional, deep and offshore oil and gas[J]. World Petroleum Industry, 2020, 27(6): 20-26.
- [5] 贾承造, 张永峰, 赵霞. 中国天然气工业发展前景与挑战[J]. 天然气工业, 2014, 34(2): 1-11.
- JIA Chengzao, ZHANG Yongfeng, ZHAO Xia. Prospects of and challenges to natural gas industry development in China[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(2): 1-11.
- [6] 李剑, 余源琦, 高阳, 等. 中国陆上深层—超深层天然气勘探领域及潜力[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(4): 403-417.
- LI Jian, SHE Yuanqi, GAO Yang, et al. Onshore deep and ultra-deep natural gas exploration fields and potentials in China[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(4): 403-417.
- [7] 苏义脑, 路保平, 刘岩生, 等. 中国陆上深井超深井钻完井技术现状及攻关建议[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(5): 527-542.
- SU Yinao, LU Baoping, LIU Yansheng, et al. Status and research suggestions on the drilling and completion technologies for onshore deep and ultra deep wells in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(5): 527-542.
- [8] 汪海阁, 黄洪春, 毕文欣, 等. 深井超深井油气钻井技术进展与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 163-177.
- WANG Haige, HUANG Hongchun, BI Wenxin, et al. Deep and ultra-deep oil/gas well drilling technologies: progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 163-177.
- [9] 汪海阁, 黄洪春, 纪国栋, 等. 中国石油深井、超深井和水平井钻完井技术进展与挑战[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(3): 1-11.
- WANG Haige, HUANG Hongchun, JI Guodong, et al. Progress and challenges of drilling and completion technologies for deep, ultra-deep and horizontal wells of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(3): 1-11.
- [10] WEATHERL M H. GOM deepwater field development challenges at Green Canyon 468 Pony[R]. SPE 137220, 2010.
- [11] JELLISON M, CHANDLER R B, LANGDON S, et al. Deepwater and critical drilling with new connection technology—case histories and lessons learned[R]. SPE 133857, 2010.
- [12] ROHLER S A, SANDERS W W, WILLIAMSON R N, et al. Challenges of drilling an ultra-deep well in deepwater-spa prospect[R]. SPE 79810, 2003.
- [13] RUIZ M L. Design and drilling of an ultra HPHT exploratory well on the Gulf of Mexico[R]. SPE 178809, 2016.
- [14] UBARU C, THOMSON I, RADFORD S. Drilling and under-reaming in the GOM deepwater ultra-deep lower tertiary: history of a record run in the world's deepest oil or gas well [R]. SPE 145259, 2011.
- [15] ALGU D, LANDGRAVE S, ESQUINANCE B, et al. Extended reach drilling in the GOM-ram powell case study[R]. SPE 92371, 2005.
- [16] IYOH O A W, MEIZE R A, MILLHEIM K K, et al. Lessons learned from integrated analysis of GOM drilling performance [R]. OTC 16290, 2004.
- [17] DYKSTRA M W, ARMENTA M A, AIN F A M, et al. Converting power to performance: gulf of Mexico examples of an optimization workflow for bit selection, drilling system design and operation[R]. OTC 29065, 2018.
- [18] HAVARD K, DURAIRAJAN B, STITH S, et al. Collaborative bit and reamer design solution for performance drilling in salt and high durability in challenging subsalt interval in one run, deepwater gulf of Mexico[R]. OTC 29783, 2019.
- [19] U. S. Department of the Interior. Bureau of safety and environmental enforcement[EB/OL]. [2022-10-18]. <https://www.data.bsee.gov>.
- [20] SHAUGHNESSY J, DAUGHERTY W, GRAFF R, et al. More ultradeepwater drilling problems[R]. SPE 105792, 2007.
- [21] 朱煜华, 张晓亮, 王树芳, 等. 井震结合复杂断裂分级识别技术及应用——以魏岗油田①号断裂带为例[J]. 石油地质与工程, 2023, 37(3): 9-16.
- ZHU Yuhua, ZHANG Xiaoliang, WANG Shufang, et al. Classification and identification technology of complex faults and its application with well-seismic integrated method: by taking No. 1 fault zone of Weigang oilfield as an example[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2023, 37(3): 9-16.
- [22] 李柯, 唐诚, 王崇敬, 等. 川南页岩小尺度断层井震结合识别方法研究[J]. 录井工程, 2022, 33(4): 125-132.
- LI Ke, TANG Cheng, WANG Chongjing, et al. Small and micro-scale fault identification method based on well logging and seismic data in southern Sichuan shale[J]. Logging Engineering, 2022, 33(4): 125-132.
- [23] 王志伟, 张凯, 武群虎, 等. 基于井震裂缝识别敏感性参数模型的碳酸盐岩储层裂缝预测方法[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(6): 163-174.
- WANG Zhiwei, ZHANG Kai, WU Qunhu, et al. A method for predicting fractures in carbonate reservoirs based on fracture identification-sensitive log-seismic parameter model[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(6): 163-174.
- [24] 胜亚楠. 钻井工程风险评估与控制技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- SHENG Yanan. Research on risk assessment and control technology of drilling engineering[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2019.
- [25] 苏强, 陈颖杰, 沈欣宇, 等. 川西地区超深井井身结构优化研究与应用——以双鱼石构造为例[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(20): 180-181.
- SU Qiang, CHEN Yingjie, SHEN Xinyu, et al. Optimization research and application of ultra deep well bore structure in western Sichuan: taking Shuangyushi structure as an example[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2017, 37(20): 180-181.
- [26] 宋周成, 翟文宝, 邓昌松, 等. 富满油田超深井井身结构优化技术与应用[J]. 钻采工艺, 2022, 45(6): 36-41.
- SONG Zhoucheng, ZHAI Wenbao, DENG Changsong, et al. Optimization technology and application of casing program of ultra-deep wells in Fuman oilfield[J]. Drilling & Production Technolo-

- gy, 2022, 45(6):36-41.
- [27] 李双贵, 于洋, 樊艳芳, 等. 顺北油气田超深井井身结构优化设计[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(2):6-11.  
LI Shuanggui, YU Yang, FAN Yanfang, et al. Optimal design of casing programs for ultra-deep wells in the Shunbei oil and gas field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(2):6-11.
- [28] 石建刚, 杨虎. 准噶尔盆地南缘下组合超深井非常规井身结构应用[J]. 新疆石油天然气, 2014, 10(4):37-40.  
SHI Jiangan, YANG Hu. Application of unconventional casing program for ultra-deep well in the lower assemblage in the southern margin of the Junggar Basin[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2014, 10(4):37-40.
- [29] 彭齐, 周英操, 周波, 等. 凸脊型非平面齿 PDC 钻头的研制与现场试验[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(2):49-55.  
PENG Qi, ZHOU Yingcao, ZHOU Bo, et al. Development and field test of a non-planar cutter PDC bit with convex ridges[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(2):49-55.
- [30] 康毅力, 王凯成, 许成元, 等. 深井超深井钻井堵漏材料高温老化性能评价[J]. 石油学报, 2019, 40(2):215-223.  
KANG Yili, WANG Kaicheng, XU Chengyuan, et al. High-temperature aging property evaluation of lost circulation materials in deep and ultra-deep well drilling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(2):215-223.
- [31] 王中华. 国内钻井液技术进展评述[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3):95-102.  
WANG Zhonghua. Review of progress on drilling fluid technology in China[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3):95-102.
- [32] 王星媛, 陆灯云, 吴正良. 抗 220℃ 高密度油基钻井液的研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(5):550-554.  
WANG Xingyuan, LU Dengyun, WU Zhengliang. Study and application of a high density oil base drilling fluid with high temperature resistance of 220℃ [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2020, 37(5):550-554.
- [33] 李炎军, 吴志明, 徐一龙, 等. 抗 220℃ 深水高密度钻井液体系构建及性能评价[J]. 化学与生物工程, 2020, 37(7):42-46.  
LI Yanjun, WU Zhiming, XU Yilong, et al. Construction and performance evaluation of deepwater high density drilling fluid system resistant to 220℃ [J]. Chemistry & Bioengineering, 2020, 37(7):42-46.
- [34] 任妍君, 翟玉芬, 路岩岩. 抗高温高密度可逆油基钻井液体系[J]. 石油学报, 2023, 44(5):841-851.  
REN Yanjun, ZHAI Yufen, LU Yanyan. Reversible oil-based drilling fluid with high-temperature resistance and high density [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(5):841-851.
- [35] 孙金声, 刘凡, 程荣超, 等. 机器学习在防漏堵漏中研究进展与展望[J]. 石油学报, 2022, 43(1):91-100.  
SUN Jinsheng, LIU Fan, CHENG Rongchao, et al. Research progress and prospects of machine learning in lost circulation control [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(1):91-100.
- [36] 孙金声, 赵震, 白英睿, 等. 智能自愈合凝胶研究进展及在钻井液领域的应用前景[J]. 石油学报, 2020, 41(12):1706-1718.  
SUN Jinsheng, ZHAO Zhen, BAI Yingrui, et al. Progress in research of intelligent self-healing gel and its application prospects in the field of drilling fluid[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12):1706-1718.
- [37] 齐奉忠, 刘硕琼, 沈吉云. 中国石油固井技术进展及发展建议[J]. 石油科技论坛, 2017, 36(1):26-31.  
QI Fengzhong, LIU Shuoqiong, SHENG Jiyun. Suggestions on CNPC cementing technological development[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2017, 36(1):26-31.
- [38] 于永金, 夏修建, 王治国, 等. 深井、超深井固井关键技术进展及实践[J]. 新疆石油天然气, 2023, 19(2):24-33.  
YU Yongjin, XIA Xiujian, WANG Zhiguo, et al. Progress and application of the key technologies of deep and ultra-deep well cementing[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2023, 19(2):24-33.
- [39] 丁士东, 陶谦, 马兰荣. 中国石化固井技术进展及发展方向[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3):41-49.  
DING Shidong, TAO Qian, MA Lanrong. Progress, outlook, and the development directions at sinopec in cementing technology progress[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3):41-49.
- [40] 王敏生, 光新军. 智能钻井技术现状与发展方向[J]. 石油学报, 2020, 41(4):505-512.  
WANG Minsheng, GUANG Xinjun. Status and development trends of intelligent drilling technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(4):505-512.

(收稿日期 2023-11-02 改回日期 2023-12-15 编辑 王培玺)