

◀专家视点▶

doi:10.11911/syztjs.2021001

引用格式: 路保平. 中国石化石油工程技术新进展与发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(1): 1-10.

LU Baoping. New progress and development proposals of Sinopec's petroleum engineering technologies [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(1): 1-10.

## 中国石化石油工程技术新进展与发展建议

路保平

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 102206)

**摘 要:** “十三五”以来, 中国石化针对深层特深层油气、致密气和非常规油气高效勘探开发中的关键技术难题, 持续加大科技攻关力度, 突破了一批制约油气勘探开发的技术瓶颈, 研发了一批高端技术装备、井下工具仪器和作业流体, 形成了优快钻井完井、高温高精度测控、精细录井和高效储层改造等技术系列, 促进了顺北油气田、涪陵页岩气田的高效勘探与效益开发, 为老油田和致密气田增储稳产提供了强有力的技术保障。但是, 目前中国石化石油工程技术装备在作业效率、技术指标、综合成本等方面与国外先进水平相比还存在较大差距, 因此在“十四五”期间, 必须大力实施创新驱动战略, 大力提升自主创新能力, 突破钻井完井、测录井及储层改造等专业的关键核心技术, 尽快提升石油工程技术装备水平, 为中国石化稳油增气降本提供技术支撑。

**关键词:** 石油工程; 钻井完井; 测井录井; 储层改造; 技术进展; 发展展望; 中国石化

**中图分类号:** TE24; TE357.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2021)01-0001-10

### New Progress and Development Proposals of Sinopec's Petroleum Engineering Technologies

LU Baoping

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 102206, China)

**Abstract:** During the 13<sup>th</sup> Five-Year Plan period, Sinopec has been continuously stepping up its scientific and technological efforts in view of the key technical problems in the efficient exploration and development of deep and ultra-deep oil and gas, tight low permeability oil and gas, and unconventional oil and gas. A number of technical bottlenecks restricting oil and gas exploration and development have been broken through; a batch of high-end technical equipment, downhole tools, instruments and fluids have been developed; a series of technologies have been formed including optimal fast drilling and completion, measurement and control under high temperature condition with high precision, fine logging and efficient reservoir stimulation. All promoted the efficient exploration and beneficial development of Shunbei ultra-deep oil and gas field and Fuling shale gas field, providing a strong technical support for increasing storage and stabilizing production in old oil fields and tight low permeability oil and gas fields. However, gaps still remain between the petroleum engineering technologies of Sinopec and foreign advanced technologies in the aspects of operation efficiency, technical index and comprehensive cost, etc. Thus, to provide Sinopec technical supports for stabilizing oil production, improving gas production and reducing cost, we must vigorously implement the innovation-driven strategy; largely enhance the ability of independent innovation; make breakthroughs in drilling and completion, logging and reservoir stimulation and other professional key core technologies; and improve the level of petroleum engineering technology and equipment as soon as possible during the 14<sup>th</sup> Five-Year Plan period.

**Key words:** petroleum engineering; drilling and completion; well logging; reservoir stimulation; technological progress; development prospect; Sinopec

“十三五”以来, 中国石化针对深层特深层油 密气藏单井产量低、难动用储量动用率低, 页岩气  
气勘探开发中存在的钻井风险大、钻井周期长, 致 储层单井产量低、综合成本高, 超高温高压随钻测

收稿日期: 2020-12-28。

**作者简介:** 路保平 (1962—), 男, 河北临城人, 1982 年毕业于华东石油学院钻井工程专业, 2001 年获石油大学 (北京) 油气井工程专业博士学位, 教授级高级工程师, 国家有突出贡献中青年专家, 主要从事石油工程技术研究与相关管理工作。系本刊编委会主任。E-mail: lubp.sripe@sinopec.com。

**基金项目:** 国家联合基金项目“海相深层地层孔隙压力形成机理及预测方法探索” (编号: U19B6003-05-01)、国家科技重大专项“低渗透油气藏高效开发钻井技术” (编号: 2016ZX05021) 和中国石化重大科技攻关项目“特深层勘探开发工程关键技术与装备” (编号: P17049) 联合资助。

量仪器和旋转导向钻井系统受国外制约等关键难题<sup>[1-3]</sup>,持续加大科技攻关力度,创立了地质环境因素精细描述技术、研制了175/185℃高温随钻测量系统、近钻头伽马成像系统、高效钻井提速工具和井下流体,形成了特深层、页岩气和低渗致密气藏钻井完井、高温高精度随钻测控、精细录井和高效储层改造等关键技术,为顺北特深油气勘探发现及产能建设、涪陵百亿方页岩气田、威-荣深层页岩气和华北致密气开发等提供了技术保障<sup>[4-6]</sup>。

## 1 石油工程技术新进展

近年来,中国石化围绕油气勘探开发需要和关键技术装备需求,开展了深层特深层安全高效钻井、复杂油气藏精细识别评价、特殊储层改造以及高端工具装备仪器等方面的研究,突破了深井安全钻井、深井钻井提速、高温高压随钻测控和复杂储层高效压裂等技术瓶颈,推进了关键技术装备国产化进程,促进了稳油增气降本<sup>[7-9]</sup>。

### 1.1 钻井地质环境因素精细描述技术

为了准确预测与精细描述钻井地质环境因素,降低钻井作业风险,减少井下复杂情况和故障,为科学钻井、地质工程一体化提供依据,开展了深层碳酸盐岩地层压力预测、岩石力学动态表征等技术研究,创新发展了钻井地质环境因素描述理论和方法,解决了钻井地质环境因素描述不系统、不连续、精度低和周期长等问题,实现了由以测试为主的传统描述方法向以井震信息为主的综合描述方法的跨越。针对常规岩石力学参数表征方法中未充分考虑钻井过程中和井眼形成后地层环境变化及地层交互耦合作用的影响,从而导致计算精度低的问题,建立了复杂工程环境下岩石力学参数动态变化规律表征方法,计算精度达到90%以上。针对碳酸盐岩地层孔隙压力成因机制复杂,以压实理论为基础的孔隙压力预测方法不再适用的问题,提出了基于孔隙流体声速、成因贡献和压差响应的孔隙压力预测、监测和检测方法,精度分别达到92%、95%和96%,实现了碳酸盐岩孔隙压力预测的重大突破<sup>[10]</sup>。针对泥页岩、干热岩和冻土等钻井过程中井壁稳定控制效果差的难题,建立了基于多场耦合的泥页岩地层井壁坍塌周期评价方法、热-流-固多场耦合作用的干热岩井筒围岩稳定性分析方法和基于热-固耦合作用机制的冻土层井壁稳定评价方法,形成了复杂地层井壁稳定技术<sup>[11]</sup>。针对复合钻

井方式缺少合适钻井基础数据描述方法的问题,建立了经典钻速模型和大数据深度融合的钻速敏感因素定量评价方法,实现了地质环境因素、机械参数、水力参数、井眼工程环境等47种影响因子的敏感性定量分析。

### 1.2 深井、复杂结构井安全高效钻井完井技术

1)深井特深井钻井完井技术。针对塔里木盆地、四川及周缘地区深井特深井钻井机械钻速低、钻井周期长和施工风险大等重大技术难题,开展了深井特深井优快钻井、钻井提速工具研制等方面的研究<sup>[12]</sup>。形成了井震融合指导钻井技术(基本原理见图1),突破了钻头前方未钻地层超前描述难题,实现了钻井工程地质环境随钻评价、技术方案动态优化和钻井风险的实时防控,现场应用30余口井,复杂故障时效同比降低37.3%<sup>[13]</sup>。构建了基于拓宽安全密度窗口、减少套管层次的井身结构优化方法,顺北油气田探井井身结构由六开优化为五开,开发井井身结构由六开优化为四开,完钻井眼直径扩大至143.9 mm,提高了井眼定向效率和井下复杂情况处理能力。提出了硬地层钻井提速“合适的钻头、足够的破岩能量和钻头稳态工况”的三要素理念,研制了高效PDC钻头、抗高温长寿命大扭矩螺杆、液动射流冲击器等新型提速工具,形成了超深小井眼钻井提速技术,可使硬地层平均机械钻速提高40%以上。研制了线性压降调控节流阀,创立了四参量、四级反馈的井底压力控制方法,开发了高温随钻封缝堵气、气滞塞和缝洞型储层钻井安全控制技术,井下溢流监测的发现流量最小为80 L,压力波动控制精度小于0.25 MPa,现场应用效果突出,气侵量减少超过90%、气窜速度降低超过75%<sup>[14-15]</sup>。开发了基于钻井地质环境因素的钻井设计软件和石油工程远程决策支持系统,实现了关键环节、重点技术方案的远程决策与指导。研制了增强型高承压胶筒和可回收、可重复坐封、双向锚定机械式测试封隔器,开发了断溶体试井分析模型及软件,实现了溶洞数量、溶洞体积、裂缝体积和储层特性等关键参数的定量描述,测试符合率大于85%。“十三五”期间,中国石化累计完成井深6 000 m以深超深井345口,其中井深7 000 m以深超深井58口,井深8 000 m以深特深井36口(其中顺北53-2H井的完钻井深8 874.40 m,垂深8 157.98 m),12次打破亚洲陆上井深纪录,保证了顺北油气田特深层和四川深层油气的高效勘探和产能建设<sup>[16]</sup>。

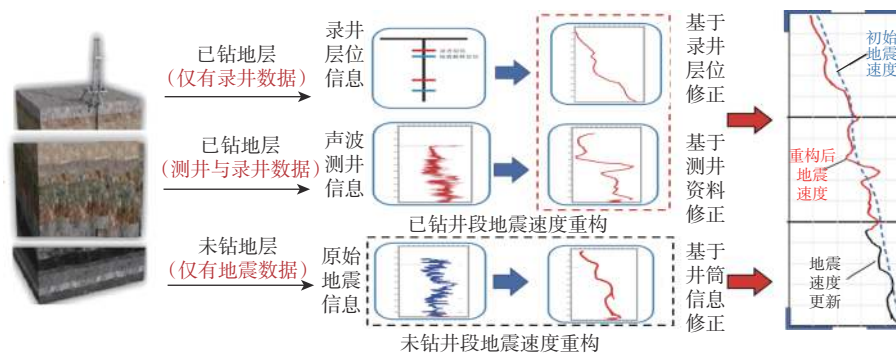


图 1 井震融合指导钻井技术基本原理

Fig.1 Basic principle of well-seismic fusion guiding drilling technology

2) 复杂结构井钻井完井技术。围绕页岩油气和致密油气提高单井产量、降低综合成本的需要,开展了超深水平井、长水平段水平井、多底井钻井完井技术研究,形成了大位移水平井降摩减阻、井眼轨迹精准控制、长水平段水平井钻井提速等关键技术,完善了复杂结构井钻井完井技术链,具备了垂深 8 000 m、井深 9 000 m 超深水平井钻井完井能力<sup>[17-18]</sup>。针对顺北油气田超深水平井定向难题,研制了 185 ℃ 高温高压 MWD、低压耗涡轮式水力振荡器、混合钻头和尖圆齿 PDC 钻头,开发了耐温 180 ℃、扭矩>2 000 N·m 的小尺寸大功率螺杆钻具和环保低摩阻钻井液体系,形成了超深水平井钻井完井配套技术,支撑了顺北油气田特深层油气开发,9 次创造亚洲陆上超深水平井井深纪录。其中顺北 71X 井(井深 8 542 m)钻井周期 132 d,创井深 8 000 m 以深超深井钻井周期最短纪录。针对川渝等地区长水平段水平井钻井摩阻大、钻具托压严重、水平段延伸困难等技术难题<sup>[19]</sup>,研制了变径稳定器等钻井工具,形成了水平段长度 3 000 m 以上超长水平段水平井钻井技术,2020 年涪陵页岩气井完钻井一趟钻比例达 40%,桩 129-1HF 井一趟钻水平位移进尺长达 3 168.78 m。针对老油田剩余油挖潜和溶洞型油气藏提高单井产量等技术难题,研制了 TAML 五级分支井完井系统、分支井壁挂式悬挂器和遇油遇水自膨胀完井工具,形成了超短半径多分支水平井钻井完井技术,TAML 五级分支井实现了机械支撑、液压密封和选择性重入功能<sup>[20]</sup>。形成了水力喷射井下转向和径向深穿透技术,单井最多钻孔 12 个,单孔最长达 100 m。研制了连续油管侧钻井下工具串及地面控制系统,耐温 125 ℃,耐压 105 MPa,扭矩 1 200 N·m,形成了导斜、钻进、信息传输和定向等配套技术,G04-19N18 井连续油管侧钻进尺 209 m,较传统侧钻施工开窗时效提高 33%,钻进时效提高

200%。研发了旋流流道式自适应节流控制器,开发了自适应调流控水完井技术,在塔河油田深层碎屑岩储层应用超过 30 井次,无水采油期延长 711 d,含水率平均降低 18% 以上,累计增油超过  $10 \times 10^4$  t<sup>[21-23]</sup>。

### 1.3 特色钻井液技术

为了满足深层特深层、易漏失地层和环境敏感地区安全高效钻井需要,基于钻井液关键处理剂研发,形成了高温高密度、低密度、耐高温、强抑制等钻井液体系<sup>[24-25]</sup>。超高温高密度钻井液体系耐温达 240 ℃、密度达 2.40 kg/L,创出了钻井液应用温度最高、超高温定向井最深等多项纪录<sup>[26]</sup>。低黏高切油基钻井液、低油水比油基钻井液和高温高密度油基钻井液体系,耐温最高 220 ℃、密度最高 2.50 kg/L,油水比最低 60/40,在涪陵、威荣、西北等地区进行了推广应用,支撑了复杂油气藏的高效勘探开发<sup>[25]</sup>。高性能水基钻井液体系密度高达 2.30 kg/L、极压润滑系数最低达 0.08,滚动回收率大于 98%,在涪陵、威荣等页岩气田进行了推广应用,减少了油基钻井液对环境的污染,降低了页岩气开发综合成本<sup>[27]</sup>。抗高温环保钻井液体系抗温 150 ℃、生物毒性  $EC_{50}$  达 56 800 mg/L。钻井液不落地随钻治理技术将钻井液废弃物总量降低 50% 以上,钻井液回收再利用技术使钻井液回用率达到 98%,满足了滩海、湿地等环境敏感区域的钻井需要。变形封堵、交联堵漏、固结堵漏、触变堵漏等系列堵漏技术,有效解决了破碎地层、缝洞地层、裂缝地层和衰竭性油气层的承压堵漏难题<sup>[28]</sup>。

### 1.4 复杂地层固井技术

为了满足深井超深井、长水平段水平井和易漏失地层固井的需要,研制了关键水泥处理剂与固井工具,形成了防漏、防窜、超深井固井技术,全面提高了固井质量。研制了一体化泡沫注氮设备,开发了高效发泡剂和高强度泡沫水泥浆体系,形成了泡沫



水泥浆固井技术,实现了注气、增压、混配一体化,水泥浆密度最低 0.70 kg/L,在涪陵、南川、东北龙凤山、苏格里等油气田应用 60 多井次,固井质量优质率 90% 以上,解决了低压漏失层固井难题<sup>[29]</sup>。改性低密度水泥浆体系在塔河油田主体区块及顺北油气田约应用 400 口井,单井固井成本降低 50 万元以上。建立了水泥浆失重气窜预测方法和分段压稳设计模型,开发了抗温 200 °C 弹性水泥浆体系(最高密度 2.82 kg/L)、非渗透防气窜水泥浆体系和胶乳/液硅增强型抗高温防气窜水泥浆体系,形成了“控压”防气窜固井技术,在顺北鹰 1 井、川深 1 井等高压油气井应用 30 余井次,固井质量合格率 100%,优良率 90% 以上。研制了全尺寸水泥环密封完整性模拟评价装置,建立了水泥环密封失效评价方法,开发了水泥环密封能力评价软件,研发了自愈合、弹性等多种水泥浆体系及固井工艺,并在页岩气井固井中进行了推广应用,使气井环空带压比例降至 8.8% (见图 2),减少了环空带压给安全生产带来的隐患。研发了基于 SCKL 改性硅铝的超高温水泥浆体系,在青海共和 GH01 干热岩井进行了现场应用,固井质量优质。研制了内嵌卡瓦尾管悬挂器、双防尾管悬挂器、无限极大排量尾管悬挂器和 V0 级耐高温高压封隔器等固井工具,实现了尾管悬挂器大悬重、防硫防酸、气密封、可旋转和大排量循环的功能,创出了应用井深最深 8 725 m、悬挂质量最大 264 t、井底最高温度 241 °C、旋转时间最长 22 h 等一系列纪录。V0 级耐高温高压固井封隔器在 204 °C 温度下气密封能力达到 70 MPa,实现了技术突破,摆脱了对国外同类工具的依赖。

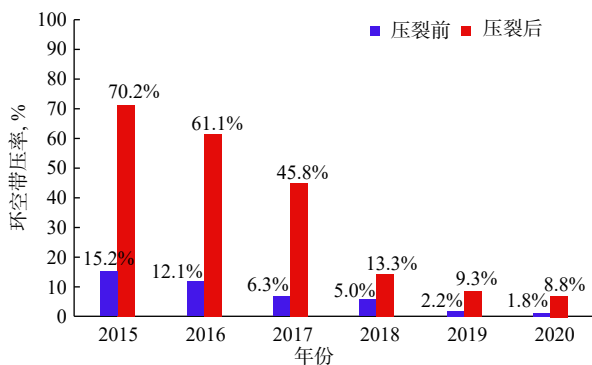


图 2 涪陵页岩气井环空带压比例变化

Fig.2 Variation of annular pressure ratio in Fuling shale gas well

### 1.5 高端测控技术

为了满足复杂油气藏精细测控的需求,开展了高温测量、随钻高精度成像测井和地质导向技术研

究,推进了高端测控技术进步<sup>[30-31]</sup>。研制了耐温 230 °C、抗压 160 MPa、 $\phi 70.0$  mm 的耐高温小直径常规测井仪和耐温 200 °C、抗压 207 MPa、 $\phi 88.9$  mm 电缆/钻具直推存储式双功能测井仪,在顺北、川渝等地区 40 余口深井超深井应用,成功率达 100%<sup>[32]</sup>。开发了偶极横波远探测仪器,建立了以“宏观、微观和渗流力学”3 大类参数为主的低孔低渗致密“九性关系”和层内模式细分为基础的储层综合评价技术,形成了岩石激发极化电位测井技术,在焦石坝区块进行了成功应用,TOC、孔隙度、含气量等储层参数计算准确率达 95% 以上,地层压力预测准确率 90% 以上<sup>[33]</sup>。在国内率先研制出近钻头伽马成像系统,测点距离钻头 0.5 m,伽马测量范围 0~1 200 API,具有 8 扇区实时成型、16 扇区存储成像功能,单趟最长工作时间 213 h、最大进尺 973 m,一次测井成功率 100%,优质储层钻遇率 100%<sup>[34]</sup>。研制了分辨率 10 mm 的随钻高分辨率电阻率成像系统,电阻率测量范围 0.2~2 000.0  $\Omega \cdot m$ ,可提供全井筒 360°微电阻率图像<sup>[35-36]</sup>。开发了耐温 150 °C、最大传输速率 12 bit/s 的钻井液脉冲和电磁信号双模式传输一体化随钻测量系统,可实现钻井液脉冲与电磁信号的实时切换,该系统与电磁信号随钻测量系统在川西、涪陵等地区共应用 58 口井,测量精度达 95% 以上,解决了多种钻井液介质和双信道的实时测量技术难题,拓展了气体/雾化钻井技术在定向井、水平井中的应用范围<sup>[37]</sup>。自主研制了常规造斜率和高造斜率 2 类旋转导向系统,已应用 14 口井,累计进尺超过 6 000 m,在焦页 70-S1HF 井顺利完成 1 922 m 水平段的钻进作业,为页岩气提速降本提供了新手段。建立了地质甜点和工程甜点评价模型,形成了页岩油气甜点评价技术,在涪陵、南川等地区进行了应用,参数计算符合率大于 90%,地质甜点和工程甜点预测精度大于 85%<sup>[38]</sup>。建立了基于大数据的地层三维精细预测方法,形成了水平井随钻实时评价和井下三维可视化钻井导航技术,实现了钻头位置的精确定位和储层边界距离的实时反演,在涪陵、南川、东胜等油气田应用 489 口井,优质储层钻遇率大于 90%<sup>[39]</sup>。

### 1.6 精细录井技术

为了提高复杂岩性及非常规储层物性、孔隙流体的识别精度,开发了页岩油气快速评价、高分辨率核磁共振录井、激光录井、岩屑声波录井等多项录井新技术,实现了储层特性的精细评价<sup>[40]</sup>。针对海相页岩气,建立了基于元素录井的小层划分、伽

马峰识别、伽马峰位置判别等地质导向模型,形成地质导向技术, A 靶点入窗率 100%、靶体钻遇率 98%。针对 PDC 钻头、荧光钻井液等复杂工程条件及低渗透、低气油比等复杂地质条件,研制了钻井液核磁共振在线录井仪和便携式多维核磁共振分析仪,建立了不同钻井液体系下的地层油一维、二维核磁共振判识与评价、油基钻屑含油率评价、非常规储层物性及孔隙流体精细识别与评价模型,实现了聚磺、混油、油基钻井液条件下的地层油识别、原油密度及地层含油量评价、纳米孔储层的油水信号识别与饱和度评价,地层含油性识别准确率达 100%<sup>[41]</sup>。针对降本增效的需求,研发了激光诱导击穿光谱(LIBS)、激光扫描共聚焦和拉曼激光气体分析仪,分别实现了元素的快速检测、孔隙的立体展示和气体的实时分析。针对岩石力学的实时性需求,研制了岩屑超声波录井分析仪,采用反射和透射 2 种方式测量岩屑的纵波波速和横波波速,与实验室测量结果对比,测量精度大于 90%<sup>[32]</sup>。

### 1.7 特殊储层改造技术

针对页岩油气、致密油气和特深层油气藏改造的需要,开展了压裂材料、分段压裂工具及压裂工艺研究,形成了页岩气体积压裂技术、薄互层多层细分压裂技术、深层碳酸盐岩储层酸压技术和干热岩体积压裂技术,为增储上产、提高单井产量提供了技术保障<sup>[42]</sup>。

1)页岩气体积压裂技术<sup>[43-45]</sup>。建立了页岩气地质工程一体化体积压裂优化设计方法,开发了多功能滑溜水、酸性滑溜水、剪切增稠滑溜水低等压裂液体系,研制了大通径桥塞、全溶桥塞和可开关滑套等分段压裂工具,研发了参数优化控制和压后评估技术,形成了中深层页岩气体积压裂、深层页岩气多尺度体积压裂、湖相页岩气穿层体积压裂、常压页岩气控缝压裂和井工厂协同体积压裂等压裂技术,具备了井深 5 000 m 以浅、水平段长 3 000 m、分段压裂 30 段以上和多井台协同压裂的能力。中深层页岩气压裂技术有力支撑了涪陵百亿方产能建设;丁页 4 侧钻水平井应用深层页岩气多尺度体积压裂技术,压裂后初期产量  $20.56 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,实现了深层页岩气勘探的突破;泰页侧 1 井应用湖相页岩气穿层体积压裂技术,实现了陆相页岩油气产量新突破;多井台协同压裂技术在焦页 10、焦页 27、威页 37 和隆页 1 等多个平台进行了应用,创出了单机组压裂 8 段的纪录。

2)深层碳酸盐岩储层酸压技术<sup>[46]</sup>。研制了耐

温 180 °C 胶凝酸体系和耐温 165 °C 交联酸体系,开发了“非均匀刻蚀+自支撑+暂堵转向”的深穿透高导流酸压工艺,在顺北油气田应用了 26 口井,酸蚀裂缝长度 140 m 以上,裂缝导流能力提高 30%,储集体沟通率由 50% 提到 78%,其中顺北 71X 井酸压后初期原油产量达到  $460 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

3)薄互层多层细分压裂技术。针对老油区开发后期高含水、油层和隔层薄、储量不能有效动用的问题,开发了以“多层改造优化设计、缝高控制技术、控水压裂液及分层压裂工艺”为核心的压裂工艺,并在安棚油田水平井进行了推广应用,压裂后产量是邻区的 2.3 倍。

4)干热岩体积压裂技术<sup>[47-48]</sup>。开展了干热岩破裂特征及裂缝延伸规律试验研究,初步形成了干热岩体积压裂技术,并进行了国内第一口干热岩井压裂试验,累计注入液量  $1 466.6 \text{ m}^3$ ,压裂后吸水能力增加 3.7 倍。通过地面测斜仪、地面微地震和广域电磁法综合监测和对比,该井热储改造形成了包含压裂裂缝和天然裂隙带的复杂裂缝体系,大幅提高了目标储层花岗岩的换热体积。

### 1.8 海洋油气工程配套技术

针对海外和南海深水钻井的需要,开展了极地/冷海钻井技术研究,形成了钻井完井风险评估与控制、冻土层安全钻井、深水钻井完井工程方案设计、浮式钻井装置选择、导管喷射下入、井控工艺、深水低温钻井液和深水低温固井等关键技术,为西非、南美等海外区块海洋油气勘探开发提供了技术支撑。针对涪西区块井眼失稳、机械钻速低、高渗储层污染严重等问题,研究形成了以孔隙压力预测、井身结构优化、井壁稳定、高效钻头、提速工具和一趟钻技术等为核心的海洋高效钻井完井技术,研发了无固相甲酸盐完井液、MO-DRILL 油基钻井液和油基钻井液岩屑处理技术,建立了以井筒清洁润滑、射孔校深、井筒完整、储层保护、油藏改造和生产管柱优化为核心的水平井开发工程配套技术,为涪洲油田勘探开发和产能建设方案优化提供了技术保障。同时,开展了天然气水合物技术研究,研发了海洋天然气水合物保温保压取心技术及工具<sup>[49]</sup>,在中国南海水深 1 310 m、泥线以下 100~123 m 水合物富集层完成 13 回次的保压取心作业,保压最高 12.01 MPa,现场点火成功。

### 1.9 储气库建设工程配套技术

针对枯竭气田地层压力低、易漏失、井筒封闭性能要求高、固井难度大等技术难题,研制了抗盐

微膨胀弹韧性水泥浆、水包油/微泡沫钻井液、耐高温缓膨气密封封堵剂和注采完井工具,开发了盖层井筒封闭性评价技术、老井封堵与评价技术,形成了枯竭气田储气库建设工程配套技术和标准体系,钻井液漏失量降低 52.3%,产层固井质量合格率 100%,盖层段固井质量优良率由 8.9% 提高至 62.8%,保证了文 23 储气库一期建设顺利完工,为国内类似储气库建设提供了借鉴<sup>[50]</sup>。针对盐穴储气库溶洗建腔和注采气过程中,腔体易产生塑性变形、注采井载荷交变等技术难题,开展了井斜控制、近平衡压力钻井、盐水钻井液和盐水塑性水泥浆等技术研究,形成了多厚夹层垮塌盐层水溶建腔、厚夹层垮塌控制、顶板保护、管柱变形预防及井下故障处理等关键技术,有效保障了盐穴储气库的建设与运营。

### 1.10 自动化石油装备

为了满足油气勘探开发的需求,提高作业效率,加大了自动化装备的研发力度<sup>[51]</sup>。研制了 7 000 m 全电动钻机和铁钻工、动力猫道、钻柱自动排放装置、缓冲机械手等配套设备,开发了司钻集成控制系统和智能化钻井参数仪表,实现了钻井操作的自动化、数字化和人机交互,降低了作业人员的劳动强度,起下钻时间较常规钻机作业缩短 30% 左右。研制了钻井液不落地装备,在不改变钻井液体系、不添加钻井液处理剂的情况下,实现了钻井液固相废弃物脱液干化、液体重复利用、废弃钻井液及钻屑不落地等随钻处理一体化,彻底去掉大循环池,实现全排量和全井段处理,平均单井钻井液消耗量降低 40% 以上<sup>[52-53]</sup>。研制了 2500 型固井车、1600 型电动固井车和自动混浆网络监控等固井装备,形成了车装、橇装、拖挂等多种模式,最高施工压力 140 MPa、排量 1.3~4.2 m<sup>3</sup>/min,具有井口参数远程监测和自动混浆控制的能力。研制了 3000 型压裂车、5000 型电动压裂装备和自动化混砂车,其中 3000 型压裂车最大功率 2 205 kW,最高工作压力 140 MPa,最大排量 4.2 m<sup>3</sup>/min,具有远程控制、自动混砂和网络自动控制的能力,可满足山区受限井场、超高压施工作业需求<sup>[54]</sup>。

## 2 石油工程技术存在的主要问题

随着油气勘探开发由中深层向深层特深层、由常规向非常规(页岩油气、致密油气和天然气水合物等)、由陆上向海洋与极地延伸,能源革命的不断

推进,以及人工智能、区块链、云计算、大数据、5G 技术与石油工程技术的不断融合,要实现油气高效勘探、效益开发和高质量发展,石油工程技术还面临诸多挑战、存在很多不足。

### 2.1 深层特深层石油工程技术装备能力不足

中国石化深层特深层油气资源区主要分布在塔里木盆地、准噶尔盆地、四川及周缘地区,油气资源当量约为 90×10<sup>8</sup> t,是主要的油气增储上产区,“十三五”期间,其油气探明储量分别占中国石化石油、天然气勘探总量的 36% 和 52%。由于储层埋藏深、地层复杂、井底温度高、压力体系复杂,对钻井装备性能要求高,而目前我国深井特深井钻井完井工具、仪器的整体性能不强,难以满足钻井、测量、测试的要求,导致钻井速度慢、井下故障多、钻井周期长、安全风险大、施工成本高、降本难度大。例如,顺北第五断裂带,储层埋藏特深(7 500~8 800 m)、井底温度和压力高(温度>160 ℃、压力>90 MPa)、地层硬(岩石强度 100~250 MPa)。

### 2.2 非常规油气开发降本增效难度大

中国石化页岩油气等非常规油气资源主要分布在四川及周缘、华北、西北等地区,储量大,是未来油气的主要接替区。目前,深层页岩气工程周期长、成本高,经济有效开发难度很大;常压页岩气工程成本高,单井产能低,压裂改造有效期短,难以实现规模效益开发;页岩油单井产能低、递减快,经济效益差。例如,2020 年威荣深层页岩气井单井钻井周期 80.4 d,而北美 Utica 地区水平段长 5 600~6 000 m 的页岩气水平井钻井周期仅约 18.0 d,与之相比我国深层页岩气井钻井速度相差甚远。目前,我国高性能钻头、长寿命提速工具和旋转导向系统等关键钻井设备缺乏或性能不高,难以满足非常规油气开发提速、提产和降本的需求。

### 2.3 复杂油气藏稳产增效工程技术还不完善

复杂油气藏及老油田主要包括胜利、中原、江苏、河南和江汉等油气田,是中国石化油气勘探开发的主阵地,开发中面临采出程度大、综合含水高、储层薄、储层类型多、非均质性强和油水关系复杂等挑战。例如,胜利、中原和江苏等油田可采储量采出程度达到 81.9%、综合含水率达到 91%,难动用储量具有低压、低渗、低丰度、低产量的特点。现有稳产增效工程技术还不能有效识别和评价剩余油分布、降低油气开发成本,实现复杂油气藏及老油田的提产、提效和经济开发,还需要进行剩余油精细描述、提高单井产量、提高采收率、降低开发成本等方面的技术攻关。



## 2.4 自动化智能化工程技术研究仍处于起步阶段

大数据、人工智能、纳米材料、智能材料等高新技术快速发展,正在催生新一轮科技及产业革命,据国际能源署(IEA)预测,到 2030 年数字技术可将全球油气技术可采资源量增加  $750 \times 10^8$  t 油当量、勘探开发成本降低 16%。因此,依靠技术创新,推动石油工程技术数字化、智能化转型,对于实现勘探开发突破至关重要。目前,中国石化基于大数据、云计算、物联网等信息技术的石油工程技术研究正处于初级阶段,信息化程度较低,自动化钻井完井技术装备能力有限,还未形成高效协同工作机制和信息共享平台,智能化钻井系统、智能导向系统、智能流体和智能精准压裂等还处于概念阶段。石油工程技术在信息化、数字化、自动化和智能化方面远低于其他行业。

## 3 石油工程技术发展展望

“十四五”是我国转变发展方式、优化经济结构、转变增长动力的关键期,中国石化确立了以能源资源为基础,以洁净能源和合成材料为两翼,以新能源、新经济、新领域为重要增长点的“一基两翼三新”发展格局,努力实现更高质量、更有效益的发展。为此,必须大力实施创新驱动战略,大力提升自主创新能力,实现石油工程核心技术的突破,全面提升石油工程技术装备水平,为中国石化稳油增气降本提供强有力的技术支撑。

### 3.1 加大重点基础前瞻技术攻关

1) 围绕顺北顺南特深层油气高效勘探开发,开展高温高压特深硬地层失稳规律与岩石破碎机理研究,解决井筒强化和钻井提速的基础问题。2) 以深层页岩油气、致密油气为对象,研究流固热多重耦合下岩石微观力学特征及裂缝延伸规律,解决高效钻井、缝网压裂难题。3) 深化人工智能、微电子、新材料(量子、纳米、石墨烯、智能)等与石油工程技术的融合研究,开发随钻智能油气识别、智能监测、智能流体和智能压裂技术,培育自动化智能化石油工程技术。4) 探索微波、冲击波、超高压破岩,纳米机器人油藏探测,页岩油原位改质和井下油水分离等技术,为科技创新和颠覆技术培育提供支撑。

### 3.2 形成油气高效开发关键工程技术体系

1) 攻克特深井钻井完井关键技术,完善 12 000 m 钻机及配套装备、超高温高压测量工具和高性能提速工具,形成成熟完善的 9 000~10 000 m 特深井钻

井完井技术体系,具备万米以上特深井钻井完井能力。2) 攻克长水平段水平井钻井提速技术、致密砂岩气藏高效压裂及高导流复合压裂技术,形成致密气藏“井工厂”立体开发技术、油气精细描述与评价技术和高含水老油田提高采收率技术,提升“一趟钻”钻井技术水平,降低开发成本,实现致密砂岩气藏高效开发。3) 完善深层页岩气高效钻井完井技术、常压页岩气低成本高效钻井技术、陆相页岩气优快钻井技术,研究攻关深层页岩气大型“井工厂”精细控压压裂、常压页岩气少段多簇均质高效缝网压裂、海陆过渡相多层系页岩气高效压裂关键技术,大幅缩短页岩气井钻井完井周期,降低开发成本,实现页岩油气经济高效开发。4) 突破页岩油开发工程技术瓶颈,研究攻关页岩油原位改质、高密度“井工厂”立体高效钻井完井和页岩油储层保护技术,为页岩油规模经济开发提供技术支撑。

### 3.3 高端技术产品实现产业化

1) 开发高端油田化学材料与流体体系,形成高温超高密度钻井完井流体、生态流体、智能流体和特殊钻井完井流体(超高温、极低温、纳米、超分子、智能材料),满足复杂地质条件下钻井完井作业对绿色环保高端流体的需要。2) 研制高性能钻头、长寿命动力钻具(涡轮寿命  $> 1\ 000$  h、大扭矩螺杆寿命  $> 800$  h)、长寿命提速工具和高端固井工具等,满足特深井钻井完井对高端井下工具的需求。3) 突破高造斜率/低成本旋转导向技术瓶颈,提高 175/185 °C 高温随钻测量、近钻头成像伽马和成像电阻率系统的性能,研制 240 °C 高温随钻测量系统、随钻远探测/前探测系统,研究多维油藏评价随钻测井技术和高速传输技术,形成中国石化智能精准测控技术产品系列,满足高效、低成本油气开发及智能化发展的需要。

### 3.4 培育自动化智能化石油工程技术

1) 研制 9 000 m 全自动钻机、自动控压系统、自动送钻系统、钻井液自动连续循环系统和自动固井装备,开发智能化控制软件和一体化操控系统,实现钻井控制的自动化、智能化。2) 研发近钻头高精度成像测量系统、自适应钻头、井下电动工具和高速无线传输技术,实现井眼轨迹的精准控制和井下工具的自适应电动化。3) 开发钻井智能分析与决策系统、钻井工程参数智能分析及优化系统、井筒稳定性风险智能诊断系统、随钻智能地层评价与导向系统、全自动钻井一体化决策分析平台,形成自动化智能化石油工程技术系列,推进智能化技术发展。

### 3.5 发展低成本石油工程技术

1)以物联网、大数据、数据链为基础,融合地质、油藏、地震、钻井、测井、录井、压裂和注采等信息,开发基于数据驱动、模型驱动的“学习曲线、知识库、措施评估、智能分析决策”等工程地质一体化信息平台,优化钻井、测井、录井、压裂和注采等技术方案。2)发展井筒模拟技术,提升钻井、压裂等专业软件和随钻远程监控及智能决策技术水平,实现油气勘探开发全过程整体技术的最优化,最大程度地降低油气勘探开发成本。

## 4 结束语

石油工程技术是实现油气勘探开发目标的主要手段,是推进油气发展的重要动力,每次石油工程技术革命都会引发油气产量和储采比的重大飞跃。经过多年科研攻关,中国石化石油工程技术装备取得了重大进步,实现了关键技术装备的国产化,形成了一套较为完善的石油工程技术体系,基本满足了油气勘探开发需求。但是,石油工程技术装备在作业效率、技术指标、综合成本等方面与国外先进水平相比还存在较大差距。因此,需要深化研发体制机制创新,加速石油工程技术发展,尽快提升我国石油工程技术装备水平,缩小与国外先进水平的差距,为我国油气高效勘探开发提供强劲的技术支撑。

### 参 考 文 献

#### References

- [1] 马永生,蔡勋育,赵培荣.石油工程技术对油气勘探的支撑与未来攻关方向思考:以中国石化油气勘探为例[J].石油钻探技术,2016,44(2):1-9.  
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. The support of petroleum engineering technologies in trends in oil and gas exploration and development: case study on oil and gas exploration in Sinopec[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(2): 1-9.
- [2] 王敏生,光新军,皮光林,等.低油价下石油工程技术创新特点及发展方向[J].石油钻探技术,2018,46(6):1-8.  
WANG Minsheng, GUANG Xinjun, PI Guanglin, et al. The characteristics of petroleum engineering technology design and innovation in a low oil price environment[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(6): 1-8.
- [3] 路保平,丁士东,何龙,等.低渗透油气藏高效开发钻完井技术研究主要进展[J].石油钻探技术,2019,47(1):1-7.  
LU Baoping, DING Shidong, HE Long, et al. Key achievement of drilling & completion technologies for the efficient development of low permeability oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(1): 1-7.
- [4] 曾涛,张弼驰,吴雪,等.斯伦贝谢近10年科技创新经验与启示[J].国际石油经济,2019,27(9):25-32.  
ZENG Tao, ZHANG Bichi, WU Xue, et al. Experiences and implications from Schlumberger's scientific and technological innovation over ten years[J]. International Petroleum Economics, 2019, 27(9): 25-32.
- [5] 吕建中,杨虹,孙乃达.全球能源转型背景下的油气行业技术创新管理新动向[J].石油科技论坛,2019,38(4):1-8.  
LYU Jianzhong, YANG Hong, SUN Naida. New orientation of oil and gas industrial technology innovation management against background of global energy transformation[J]. Oil Forum, 2019, 38(4): 1-8.
- [6] 袁磊,杨虹,何艳青.国内外大型先进企业开放式创新的动因与模式[J].石油科技论坛,2015,34(4):25-30.  
YUAN Lei, YANG Hong, HE Yanqing. Motivations and models of open innovation at Chinese and overseas large-scale excellent enterprises[J]. Oil Forum, 2015, 34(4): 25-30.
- [7] 丁士东,赵向阳.中国石化重点探区钻井完井技术新进展与发展建议[J].石油钻探技术,2020,48(4):11-20.  
DING Shidong, ZHAO Xiangyang. New progress and development suggestions for drilling and completion technologies in Sinopec key exploration areas[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(4): 11-20.
- [8] 张锦宏.中国石化石油工程技术现状及发展建议[J].石油钻探技术,2019,47(3):9-17.  
ZHANG Jinhong. Current status and outlook for the development of Sinopec's petroleum engineering technologies[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3): 9-17.
- [9] 路保平,丁士东.中国石化页岩气工程技术新进展与发展展望[J].石油钻探技术,2018,46(1):1-9.  
LU Baoping, DING Shidong. New progress and development prospect in shale gas engineering technologies of Sinopec[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(1): 1-9.
- [10] 路保平,鲍洪志,余夫.基于流体声速的碳酸盐岩地层孔隙压力求取方法[J].石油钻探技术,2017,45(3):1-7.  
LU Baoping, BAO Hongzhi, YU Fu. A pore pressure calculating method for carbonate formations based on fluid velocity[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(3): 1-7.
- [11] 王兴隆,程远方,赵益忠.钻井作业中泥页岩地层井壁稳定受温度影响的规律研究[J].石油钻探技术,2007,35(2):42-45.  
WANG Xinglong, CHENG Yuanfang, ZHAO Yizhong. The effect of temperature on wellbore stability in shales during drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(2): 42-45.
- [12] 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 Yi'nao, 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.
- [13] 路保平,袁多,吴超,等.井震信息融合指导钻井技术[J].石油勘探与开发,2020,47(6):1227-1234.  
LU Baoping, YUAN Duo, WU Chao, et al. A drilling technology guided by well-seismic information integration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1227-1234.
- [14] 柴龙,林永学,金军斌,等.塔河油田外围高温高压井气滞塞防气窜技术[J].石油钻探技术,2018,46(5):40-45.  
CHAI Long, LIN Yongxue, JIN Junbin, et al. Anti-gas channeling technology with gas-block plug for high temperature and high pressure wells in the periphery of the Tahe Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(5): 40-45.



- [15] 罗发强, 韩子轩, 柴龙, 等. 抗高温气滞塞技术的研究与应用 [J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(2): 165-169.  
LUO Faqiang, HAN Zixuan, CHAI Long, et al. Study and application of high temperature gas blocking plug[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2019, 36(2): 165-169.
- [16] 赵志国, 白彬珍, 何世明, 等. 顺北油田超深井优快钻井技术 [J]. 石油钻探技术, 2017, 45(6): 8-13.  
ZHAO Zhiguo, BAI Binzhen, HE Shiming, et al. Optimization of fast drilling technology for ultra-deep wells in the Shunbei Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(6): 8-13.
- [17] 韩烈祥. 川渝地区超深井钻完井技术新进展 [J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(5): 555-561.  
HAN Liexiang. New progress of drilling and completion technologies for ultra-deep wells in the Sichuan-Chongqing Area[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(5): 555-561.
- [18] 曾义金. 海相碳酸盐岩超深油气井安全高效钻井关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 25-33.  
ZENG Yijin. Key technologies for safe and efficient drilling of marine carbonate ultra-deep oil and gas wells[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 25-33.
- [19] 刘伟, 何龙, 胡大梁, 等. 川南海相深层页岩气钻井关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(6): 9-14.  
LIU Wei, HE Long, HU Daliang, et al. Key technologies for deep marine shale gas drilling in Southern Sichuan[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(6): 9-14.
- [20] 马开华, 谷磊, 叶海超. 深层油气勘探开发需求与尾管悬挂器技术进步 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 34-40.  
MA Kaihua, GU Lei, YE Haichao. The demands on deep oil/gas exploration & development and the technical advancement of liner hangers[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 34-40.
- [21] 赵旭, 姚志良, 胡兴军, 等. 一种新型自适应调流控水装置的设计及机理研究 [J]. 机床与液压, 2019, 47(6): 69-75.  
ZHAO Xu, YAO Zhiliang, HU Xingjun, et al. Design and principle analysis of a new type of adaptive inflow control device[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2019, 47(6): 69-75.
- [22] 赵旭, 龙武, 姚志良, 等. 水平井砾石充填调流控水筛管完井技术 [J]. 石油钻探技术, 2017, 45(4): 65-70.  
ZHAO Xu, LONG Wu, YAO Zhiliang, et al. Completion techniques involving gravel-packing inflow-control screens in horizontal wells[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(4): 65-70.
- [23] 赵旭. 自适应调流控水技术研究及试验 [J]. 石油机械, 2019, 47(7): 93-98.  
ZHAO Xu. Automatic inflow control technology for water control[J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 47(7): 93-98.
- [24] 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.
- [25] 林永学, 王显光. 中国石化页岩气油基钻井液技术进展与思考 [J]. 石油钻探技术, 2014, 42(4): 7-13.  
LIN Yongxue, WANG Xianguang. Development and reflection of oil-based drilling fluid technology for shale gas of Sinopec[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(4): 7-13.
- [26] 林永学, 王伟吉, 金军斌. 顺北油气田鹰 1 井超深井段钻井液关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 113-120.  
LIN Yongxue, WANG Weiji, JIN Junbin. Key drilling fluid technology in the ultra deep section of Well Ying-1 in the Shunbei Oil and Gas Field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 113-120.
- [27] 林永学, 甄剑武. 威远区块深层页岩气水平井水基钻井液技术 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(2): 21-27.  
LIN Yongxue, ZHEN Jianwu. Water based drilling fluid technology for deep shale gas horizontal wells in Block Weiyuan[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(2): 21-27.
- [28] 赵锐, 赵腾, 李慧莉, 等. 塔里木盆地顺北油气田断控缝洞型储层特征与主控因素 [J]. 特种油气藏, 2019, 26(5): 8-13.  
ZHAO Rui, ZHAO Teng, LI Huili, et al. Fault-controlled fracture-cavity reservoir characterization and main-controlling factors in the Shunbei hydrocarbon field of Tarim Basin[J]. *Special oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(5): 8-13.
- [29] 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.
- [30] 侯亮, 杨虹, 刘知鑫. 2019 测井技术发展动向与展望 [J]. 世界石油工业, 2019, 26(6): 58-63.  
HOU Liang, YANG Hong, LIU Zhixin. Development and prospect of well logging technologies in 2019[J]. *World Petroleum Industry*, 2019, 26(6): 58-63.
- [31] 张桂清. 随钻测井发展历程及四大服务公司的随钻测井技术 [R]. 北京: 中国石油集团经济技术研究院, 2011.  
ZHANG Guiqing. The development of logging while drilling technology and the technology in the four major service companies[R]. Beijing: CNPC Economic & Technology Research Institute, 2011.
- [32] 许玛丽. 国内外随钻测量技术现状与展望 [J]. 化工管理, 2019(17): 109-110.  
XU Mali. Present situation and prospect of MWD technology at home and abroad[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2019(17): 109-110.
- [33] 杨虹. 四大测井服务公司的技术管理模式 [J]. 测井技术, 2010, 34(6): 511-516.  
YANG Hong. The R & D strategies and management of the major logging service companies[J]. *Well Logging Technology*, 2010, 34(6): 511-516.
- [34] 路保平, 倪卫宁. 高精度随钻成像测井关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 148-155.  
LU Baoping, NI Weining. The key technologies of high precision imaging logging while drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 148-155.
- [35] 王丽忱, 朱桂清, 甄鉴. 随钻测井数据传输技术新进展 [J]. 石油科技论坛, 2014, 33(6): 42-45.  
WANG Lichen, ZHU Guiqing, ZHEN Jian. New progress in LWD data transmission technology[J]. *Oil Forum*, 2014, 33(6): 42-45.
- [36] 周小慧, 宋桂桥, 张卫华, 等. 随钻地震技术及其新进展 [J]. 石油物探, 2016, 55(6): 913-923.  
ZHOU Xiaohui, SONG Guiqiao, ZHANG Weihua, et al. Current research progress of seismic while drilling technology[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2016, 55(6): 913-923.
- [37] 李新, 肖立志, 刘化冰. 随钻核磁共振测井的特殊问题与应用实例 [J]. 测井技术, 2011, 35(3): 200-205.  
LI Xin, XIAO Lizhi, LIU Huabing. Key issues and application cases of NMR logging while drilling[J]. *Well Logging Technology*, 2011, 35(3): 200-205.
- [38] 廖东良, 路保平, 陈延军. 页岩气地质甜点评价方法: 以四川盆地焦石坝页岩气田为例 [J]. 石油学报, 2019, 40(2): 144-151.  
LIAO Dongliang, LU Baoping, CHEN Yanjun. An evaluation meth-

- od of geological sweet spots of shale gas reservoir: a case study of the Jiaoshiba Gas Field, Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(2): 144–151.
- [ 39 ] 陈晓静. 国内外 MWD 仪器的发展和应用 [J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2018, 38(14): 92–93.  
CHEN Xiaojing. Development and application of MWD instrument at home and abroad[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2018, 38(14): 92–93.
- [ 40 ] 刘乃震, 王忠, 刘策. 随钻电磁波传播方位电阻率仪地质导向关键技术 [J]. *地球物理学报*, 2015, 58(5): 1767–1775.  
LIU Naizhen, WANG Zhong, LIU Ce. Theories and key techniques of directional electromagnetic propagation resistivity tool for geosteering applications while drilling[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(5): 1767–1775.
- [ 41 ] 倪卫宁, 张晓彬, 万勇, 等. 随钻方位电磁波电阻率测井分段组合线圈系统设计 [J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(2): 115–120.  
NI Weining, ZHANG Xiaobin, WAN Yong, et al. The design of the coil system in LWD tools based on azimuthal electromagnetic-wave resistivity combined with sections[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(2): 115–120.
- [ 42 ] 蒋廷学, 周珺, 贾文峰, 等. 顺北油气田超深碳酸盐岩储层深穿透酸压技术 [J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(3): 140–147.  
JIANG Tingxue, ZHOU Jun, JIA Wenfeng, et al. Deep penetration acid-fracturing technology for ultra-deep carbonate oil & gas reservoirs in the Shunbei Oil and Gas Field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 140–147.
- [ 43 ] 陈作, 曾义金. 深层页岩气分段压裂技术现状及发展建议 [J]. *石油钻探技术*, 2016, 44(1): 6–11.  
CHEN Zuo, ZENG Yijin. Present situations and prospects of multi-stage fracturing technology for deep shale gas development[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, 44(1): 6–11.
- [ 44 ] 冯国强, 赵立强, 卞晓冰, 等. 深层页岩气水平井多尺度裂缝压裂技术 [J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(6): 77–82.  
FENG Guoqiang, ZHAO Liqiang, BIAN Xiaobing, et al. Multi-scale hydraulic fracturing of horizontal wells in deep shale gas plays[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(6): 77–82.
- [ 45 ] 王海涛, 蒋廷学, 卞晓冰, 等. 深层页岩气压裂工艺优化与现场试验 [J]. *石油钻探技术*, 2016, 44(2): 76–81.  
WANG Haitao, JIANG Tingxue, BIAN Xiaobing, et al. Optimization and field application of hydraulic fracturing techniques in deep shale reservoirs[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, 44(2): 76–81.
- [ 46 ] 刘建坤, 蒋廷学, 周林波, 等. 碳酸盐岩储层多级交替酸压技术研究 [J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(1): 104–111.  
LIU Jiankun, JIANG Tingxue, ZHOU Linbo, et al. Multi-stage alternative acid fracturing technique in carbonate reservoirs stimulation[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(1): 104–111.
- [ 47 ] 陈作, 张保平, 周健, 等. 干热岩热储体积改造技术研究及试验 [J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(6): 82–87.  
CHEN Zuo, ZHANG Baoping, ZHOU Jian, et al. Research and test on the stimulated reservoir volume technology of hot dry rock[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(6): 82–87.
- [ 48 ] 陈作, 许国庆, 蒋漫旗. 国内外干热岩压裂技术现状及发展建议 [J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(6): 1–8.  
CHEN Zuo, XU Guoqing, JIANG Manqi. The current status and development recommendations for dry hot rock fracturing technologies at home and abroad[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(6): 1–8.
- [ 49 ] 任红, 裴学良, 吴仲华, 等. 天然气水合物保温保压取心工具研制及现场试验 [J]. *石油钻探技术*, 2018, 46(3): 44–48.  
REN Hong, PEI Xueliang, WU Zhonghua, et al. Development and field tests of pressure-temperature preservation coring tools for gas hydrate[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(3): 44–48.
- [ 50 ] 赵金洲. 文 23 地下储气库关键工程技术 [J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(3): 18–24.  
ZHAO Jinzhou. The key engineering techniques of the Wen 23 underground gas storage[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 18–24.
- [ 51 ] 李根生, 宋先知, 田守崧. 智能钻井技术研究现状及发展趋势 [J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(1): 1–8.  
LI Gensheng, SONG Xianzhi, TIAN Shouceng. Intelligent drilling technology research status and development trends[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(1): 1–8.
- [ 52 ] 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, 43(4): 505–512.  
WANG Minsheng, GUANG Xinjun. Status and development trends of intelligent drilling technology[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 43(4): 505–512.
- [ 53 ] 闫铁, 徐瑞, 刘维凯, 等. 中国智能化钻井技术研究发展 [J]. *东北石油大学学报*, 2020, 44(4): 15–21.  
YAN Tie, XU Rui, LIU Weikai, et al. Research and development of intelligent drilling technology in China[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2020, 44(4): 15–21.
- [ 54 ] 张立立, 高迅. 7000 米钻机自动化升级改造系统的研制及应用 [J]. *石化技术*, 2019, 26(12): 232–236.  
ZHANG Lili, GAO Xun. Development and application of automatic upgrading system for 7000m drilling rig[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2019, 26(12): 232–236.

[ 编辑 陈会年 ]