

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2019061

中国石化石油工程技术现状及发展建议

张锦宏

(中国石化石油工程技术服务有限公司, 北京 100020)

摘 要: 石油工程技术是实现油气勘探开发的手段,是推进油气发展的重要动力。为了实现复杂油气藏的高效勘探开发和剩余油气的挖潜增效,满足勘探开发日益迫切的石油工程技术需求,中国石化近几年重点开展了优快钻井完井技术、复杂地层测井录井技术、特殊储层改造技术等攻关和相关装备的研制工作,有力支撑了中国石化 70 多个盆地、500 多个区块的油气勘探开发和海外 5 大区域近 40 个国家油田技术服务市场的开拓。综述了中国石化石油工程技术的发展现状,着重介绍了钻井完井、测井录井和储层改造方面取得的技术突破;结合中国石化石油工程技术的发展目标和新的技术需求提出了发展建议,即加快发展关键核心技术,进一步完善适用于超深油气藏、页岩油气藏、致密油气藏、东部老油田等的集成配套技术,并重视非常规能源、深水油气开发技术的研究,全力打造一体化服务能力。

关键词: 勘探开发; 石油工程; 技术现状; 发展建议; 中国石化

中图分类号: TE21

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2019)03-0009-09

Current Status and Outlook for the Development of Sinopec's Petroleum Engineering Technologies

ZHANG Jinhong

(Sinopec Oilfield Service Corp., Beijing, 100020, China)

Abstract: Petroleum engineering technology is the means to realize oil/gas exploration and development and also an important momentum for pushing the development of oil and gas industry. In order to achieve efficient exploration and development of complex oil/gas reservoirs and tap the remaining oil/gas and to meet urgent demands for petroleum engineering technologies, Sinopec has carried out technology research and development in fields of quick drilling and completion, wireline logging and mudlogging for complex formations, special formation stimulation, and also engaged in the development of matching equipment. These achievements provided strong support for the oil/gas exploration and development in over 70 basins and over 500 blocks, as well as for the oilfield technical service market exploration in nearly 40 countries. This paper presents the current development status of Sinopec's petroleum engineering technologies, and highlights technical breakthroughs in drilling and completion, wireline logging, mudlogging and reservoir stimulation made by Sinopec. Considering the development goals of Sinopec petroleum engineering technologies and new demand for technologies, it also proposes to accelerate the development of core technologies and further improve technologies for ultra-deep oil/gas reservoirs, shale oil/gas reservoirs, tight oil/gas reservoirs, mature oilfield in east China, and give full attention to the technology research and development for unconventional energies and deep-water oil and gas. All these efforts will help to enhance the integrated service capacity of Sinopec.

Key words: exploration and development; petroleum engineering; technology status; development direction; Sinopec

近年来,中国石化重点围绕优快钻井完井技术、复杂储层测井录井技术、特殊储层改造技术等石油工程技术开展了攻关,初步形成了超深井钻井提速技术、随钻测控技术、声波远探测测井技术和水平井分段压裂技术等一批核心技术,规模化推广和产业化应用效果显著,有力支撑了中国石化国内外油气资源的勘探开发。但随着油气勘探开发程度的不断深入,中国石化东部老油田已进入高含水、

高采出程度阶段,西部、南方等区块主要分布在复杂构造区域及盆地周边,油气资源埋藏深,勘探开发难度越来越大,对石油工程技术的要求越来越

收稿日期: 2019-03-14。

作者简介: 张锦宏(1963—),男,江苏泰州人,1983年毕业于华东石油学院钻井工程专业,2004年获石油大学(北京)管理学硕士学位,教授级高级经济师,主要从事石油工程技术管理工作。系本刊编委。E-mail: zhangjh.os@sinopec.com。

高,需要持续攻关完善关键核心技术和工程配套技术,不断提升石油工程技术对勘探开发的支撑能力。为此,笔者综述了中国石化石油工程技术现状,结合发展目标和技术需求,提出了发展建议。

1 石油工程技术现状

1.1 钻井完井技术

1.1.1 深井、超深井钻井完井配套技术

针对深井超深井地质条件复杂、岩石强度高和钻井难度大等问题,中国石化围绕顺北、川东北等重点地区的深井、超深井钻井完井技术难题,系统开展了重点探区地质特征分析、井身结构优化设计^[1-3]、超深井综合提速技术^[4-6]和超深井安全防控技术^[7-9]等技术攻关,突破了深层安全快速钻井关键技术瓶颈,形成了以工艺、工具、仪器和材料为核心的配套技术,已具备了较为成熟的8 000.00 m以深复杂地层钻井完井设计、施工、技术服务和技术支持能力,成功完成了顺北鹰1井、顺北蓬1井、川深1井、塔深1井等多口高难度超深井的钻井完井施工。其中,顺北鹰1井完钻井深8 588.00 m,超深水平井顺北7井造斜点井深7 738.00 m、垂深达7 863.66 m。

1)复杂地质条件下超深井地质环境精细描述技术。初步建立了核心地区地层孔隙压力、破裂压力和坍塌压力的三压力剖面分析预测模型,开展了复杂地应力反演分析,预测精度较高。川东北元坝地区地应力反演精度达85.0%以上,川东北河坝101井钻前压力预测精度达到89.7%。

2)井身结构优化设计技术。针对新疆顺北区块油气井套管层次多、火成岩地层漏失等问题,建立了深部地层压力剖面,分析了裂缝形成及泥岩坍塌机理,校核了钻杆及套管强度,形成了超深井井身结构优化设计方法。顺北1区侵入体区域 $\phi 120.7$ mm井眼存在定向能力和处理复杂情况能力弱的问题,经过优化形成了完钻井眼为 $\phi 143.9$ mm的新四级井身结构。

3)超深井综合提速技术。研制并应用高性能PDC钻头、长寿命螺杆、旋冲钻井工具、扭冲钻井工具和射流冲击器等新型钻井工具,形成了超深井提速技术,机械钻速大幅提高,钻井周期大幅缩短。顺北5X井通过优选球形限位齿PDC钻头,采用“PDC钻头+大扭矩螺杆”提速技术,古生界深部地层机械钻速较设计提高20.3%,钻井周期缩短22.54 d。

4)超深水平井钻井完井技术。研制了抗高温随钻测量仪器、一趟钻开窗侧钻工具等,在超深复杂地层开窗侧钻和定向技术方面取得了突破,解决了超深水平井降摩减阻、井眼轨迹测控等技术难题,顺利钻成了顺北评1H井、顺北评2H井和元坝121H井等数十口井,水平井完钻井深最深8 433.00 m,垂深最深7 751.60 m,有力推动了深层油气的开发。

5)超深井安全防控技术。研制了自动节流管汇、回压补偿系统和高精度质量流量计等精细控压系统模块,形成了三参数(套压、立压、流量)井筒压力综合控制方法,解决了海相碳酸盐岩地层压力预测困难、气体侵入快、钻井风险高的技术难题,顺利完成了顺南蓬1井四开井段(6 076.00~6 980.00 m)控压钻进作业和 $\phi 193.7$ mm尾管控压固井作业。

1.1.2 复杂结构井钻井技术

针对复杂结构井钻井中存在的水平位移延伸能力弱、完井方式单一和密集丛式井施工难度大等问题,开展了超深水平井^[10]、高级别分支井^[11]和海上密集丛式井等钻井完井配套技术^[12]的攻关研究,形成了满足多种储层、薄油层和整装区块增产挖潜需要的复杂结构井钻井技术,成功完成了焦页2-5HF井、高平1井、河3-支平1井等重点井的施工。

1)长水平段水平井钻井技术。研制了水力振荡器、变径稳定器等钻井工具,形成了长水平段水平井钻井配套技术,在胜利油田、涪陵地区完成数十口长水平段水平井,水平段最长达3 065.00 m,水平位移最大达5 350.38 m,水垂比达到4.02,基本具备了2 500.00 m水平段一趟钻、水平段3 000.00 m以上水平井和位移5 000.00 m以上大位移井的钻井施工能力。

2)高级别分支井钻井完井技术。研制了TAML五级分支井连接系统、井眼连接总成和遇油遇水自膨胀完井工具,实现了机械支撑完整性、液压密封性、选择性再进入等功能,完成了国内第一口真正意义上的五级分支水平井——河3-支平1井^[11]。

3)径向水平井钻井技术。研发了水力喷射井下转向系统和高压输送系统,形成了径向深穿透钻井技术,单井最多钻12个孔,单孔长度最长100.00 m。

4)鱼骨状分支水平井钻井技术。开展了鱼骨状分支水平井钻井柱摩阻扭矩预测、主井眼与分支井眼轨迹控制、完井管柱安全下入研究,形成了鱼骨状分支水平井技术。鱼骨状分支水平井分支最多可达23个,推动了低渗透、薄互层等油藏的开发。

5)海上密集丛式井钻井完井技术。形成了密集

丛式井组钻井工程优化设计、大井眼极浅地层表层预定向、小井距丛式井井眼轨迹精细控制与防碰、无污染海水钻井液和废弃钻井液无害化处理等技术,先后完成了老 168 井组、垦东 123 井组及青东 5 井组等海上大型密集丛式井组的施工。

1.1.3 随钻测控技术

围绕随钻测量、地质导向、随钻测井和井下控制等技术,开展攻关和产业化应用,目前已拥有成熟的 MWD、伽马、电阻率、边界探测等 SINOMACS 随钻测控仪器,形成了一体化随钻测控技术平台。

1) 高温随钻测量技术。开发了低功耗高温测控电路系统,建立了高温传感器标定数学模型,实现了高温条件下的高精度测量。研发了高温 MWD 系统可靠性检测技术,开发出 175 °C MWD 系统,井斜角测量精度 $\pm 0.1^\circ$,方位测量精度 $\pm 1.0^\circ$ 。现场试验 12 井次,单井次连续无故障工作时间最长 279 h,单趟钻进尺最长 4 200.00 m,井底最高测量温度 160 °C。研制了 185 °C MWD 系统,在顺北区块 2 口井进行了现场试验,最高测量温度 162 °C,累计循环工作时间 478 h^[13]。

2) 随钻测井及地质导向技术。开发了随钻伽马成像系统,实现了实时 4 扇区、内存 16 扇区高精度成像测量^[14]。开发了第二代近钻头地质导向技术,实现了近钻头井斜角、方位伽马和钻头转速等多参数测量,测量零长 0.60 m。研制了方位深电阻率随钻地层边界探测仪器,地层边界探测深度 4.80 m。

3) 旋转导向技术。合作开发了 ATS-III 型旋转导向系统,并进行了现场试验,增斜、稳斜、调整方位效果明显,无故障工作时间 114 h,累计进尺 927.00 m,最大造斜率 5.61°/30m,平均机械钻速 11.00 m/h,比采用动力钻具滑动钻进提高 37%,实钻井眼轨迹与设计轨道吻合,初步具备了现场应用条件。

1.1.4 钻井液技术

针对安全、快速、高效钻井和环境保护的要求,研制了高温、高密度及环保型系列钻井液处理剂,形成了高温高密度、烷基糖苷仿油基、低活度强封堵和页岩气高性能等水基钻井液和油基钻井液,满足了复杂地质条件下的钻井需求,提高了环境保护、油气层保护和井壁稳定能力,保证了钻井安全。

1) 高温高密度水基钻井液。通过研制超高密度微粉体加重剂、抗高温处理剂,形成了抗高温高密度水基钻井液,解决了高温高密度条件下采用重晶石加重带来的固相含量高、易沉降,长期高温下处

理剂失效严重,高温高压滤失量与流变性难以控制等难题^[15]。现场应用中,泌深 1 井钻井液温度最高达 236 °C,官深 1 井钻井液密度最高达 2.87 kg/L。

2) 低活度强封堵水基钻井液。通过研究页岩地层的活度,研发了基于“适度降低活度+多尺度封堵”的低活度强封堵钻井液,其活度最低可达 0.80,泥页岩膜效率较常规水基钻井液提高 30% 以上^[16]。该钻井液在 10 余口井进行了应用,均较好地抑制了黏土和岩屑的水化膨胀,井眼稳定效果良好。其中, CB6FB-P1 井所用钻井液性能优良,钻井完井过程中井壁稳定,筛管下入顺利;试油效果显著,日产油 107 m³,日产油 50 m³,远远超出了预期效果。

3) 烷基糖苷衍生物水基钻井液。形成了以烷基糖苷衍生物吸附成膜、拉紧晶层作用为基础的强抑制技术,以纳米-微米封堵材料和 APD 小分子增稠剂为核心的强封堵技术,以烷基糖苷衍生物配合极压润滑剂的高效润滑技术,利用烷基糖苷衍生物的协同增效作用与其对重晶石的润湿作用控制高密度钻井液的流变性^[17]。烷基糖苷衍生物水基钻井液抗温达 140 °C,抗污染能力强,半数效应浓度 EC₅₀ 超过 120 000 mg/L。该钻井液在川南、陕北等地区的多口井进行了应用,解决了页岩气水平井易垮塌、摩阻大和井眼清洁困难等问题。其中,长宁 H26-4 井平均井径扩大率为 2.05%,较邻井降低 89.8%;云页-平 6 井平均井径扩大率为 4.9%,较邻井降低 75.8%。

4) 高性能水基钻井液。在优选抑制剂、封堵剂和润滑剂的基础上,研制了高性能水基钻井液 SM-Shale Mud^[18]。该钻井液流变性好,高温高压滤失量低、润滑系数小,可耐 140 °C 高温。在威页 23 平台 3 口井进行了试验,浸泡 67 d 后井眼仍保持稳定,高温高压滤失量为 5.4~6.4 mL,表明该钻井液具有强抑制性、强封堵能力,可以解决页岩气长水平段水平井井眼失稳的问题。

5) 低油水比抗高温油基钻井液。研发了低油水比(65/35)、抗 200 °C 温度的油基钻井液,形成了油基钻井液重复利用和含油钻屑无害化处理系列配套技术,基油回收利用率超过 70%。低油水比抗高温油基钻井液性能稳定、携岩性能好,井壁稳定效果好、施工井段摩阻低,防卡润滑性能好、完井作业顺利,在涪陵、威远、丁山和武隆等页岩气区块的 400 余口井进行了应用,效果显著^[19]。研制了合成基钻井液,在国内首次实现长裸眼段未下技术套管情况下将水基钻井液转化为合成基钻井液,并保证了裸眼段的井壁稳定。

1.1.5 复杂地层固井技术

针对顺南区块超深海相地层、涪陵页岩气田、枯竭气藏储气库和杭锦旗气田存在的高温、高压、环空带压和漏失等问题,研发了大温差弹韧性水泥浆、抗高温胶乳防窜水泥浆、超高密度水泥浆、纳米二氧化硅水泥浆、氮气泡沫低密度水泥浆,以及各类尾管悬挂器、管外封隔器和大排量固井水泥车等工具和设备^[20-22],成功完成了马深1井、顺北蓬1井等高温高压超深井的固井施工。

1)超深井抗高温高压固井技术。近两年,完成井深超过8 000.00 m的超深井近30口,固井质量优良率达到85%以上,很好地满足了勘探开发需求。大温差缓凝剂适应温差超过100℃,最高耐温160℃,顺北5井一次封固段长7 315.00 m;抗高温水泥浆在温度238℃的松科2井进行了应用;文27-421井水泥浆最高密度达到2.82 kg/L。形成了深井尾管快速下入技术,突破了传统尾管固井工具中途循环压力受限、易提前坐挂的技术瓶颈。

2)恶性漏失地层超低密度水泥浆固井技术。采用注氮、发泡一体化设计,成功研制出机械充氮一体化泡沫固井装备,实现了施工数据实时采集和水泥浆密度自动监控,已累计应用26口井,密度最低达1.14 kg/L,最大井深4 000.00 m,单次封固井段最长2 800.00 m,防漏效果显著。开发出无机固化复合型双酚环氧树脂减轻剂,密度0.98 kg/L,粒径9.2~50.0 μm,在井深超过4 000.00 m的盐22-斜103井进行了应用,返出浆体密度变化幅度≤0.03 kg/L。

3)页岩气水平井防窜固井技术。建立了水泥石循环加卸载弹韧性应力-应变本构方程,研制了水平井顶替效率模拟评价和固井双界面胶结质量评价装置,进一步揭示了高温高应力作用下水泥环密封失效机理。开发了胶乳韧性水泥浆、遇烃自愈合水泥浆、双凝双密度防漏水泥浆及油基钻井液滤饼高效清洗液,水平井固井质量优良率超过90%,有力支持了涪陵一期、二期和威荣、丁山地区页岩气的开发。

4)固井配套工具。研制开发了平衡式尾管悬挂器、旋转尾管悬挂器、牵制型尾管悬挂器、金属-橡胶双密封膨胀悬挂器、打捞式免钻塞封隔注水泥固井工具、套管漂浮下入接箍、遇油遇水自膨胀辅助固井短节、液压膨胀式扶正器、随行振荡器和振动固井短节等一批辅助固井工具,丰富了复杂地层的固井完井手段。

1.1.6 钻井自动化装备

为推动钻井技术装备向高端发展,加大了钻井自动化装备的研发力度,以促进其快速发展。研发了钻机管柱自动化操作、钻井液不落地环保设备和钻井液参数在线自动测量等多项核心装备,提高了钻井装备的自动化水平。

1)钻井管柱自动化操作系统。研制了配套动力猫道、钻台机械手、铁钻工、二层台自动排管装置、动力卡瓦、自动吊卡、动力鼠洞、缓冲机械手、液压动力集成系统和司钻集成控制系统等关键设备,形成了DREAM-1系列钻井管柱自动化操作系统,实现了钻井过程中管柱输送与运移、钻进作业与起下钻过程管柱操作的自动化,降低了工人劳动强度和操作安全风险,提升了钻机的自动化水平,可用于在役或新建钻机的自动化配套^[23]。目前已完成与ZJ30型、ZJ50型钻机的配套,现场应用12口井,设备运行稳定。

2)钻井液不落地环保设备。成功研发了钻井液不落地工艺及装备,实现了钻井液固相控制与随钻处理一体化,在不改变钻井液、不额外添加常用钻井液添加剂的情况下,做到钻井液固相废弃物脱液干化、液体重复利用和废弃钻井液及钻屑现场不落地,彻底去掉大循环池,实现全排量、全井段处理和减量化目标。目前已经推广钻井液不落地设备51套,胜利油区及新疆油区218口井采用了钻井液不落地工艺,平均单井钻井液消耗量降低40%以上。

3)钻井液参数在线自动测量设备。实现了10个钻井液参数的实时自动测量、连续记录及数据远程传输。目前已研制了5套工程样机,在10口井进行了试验,测量结果满足API的精度要求。

4)VDX钻井参数仪。自主研发了VDX数字钻井参数仪,适用于丛式井和气探井等高端钻井领域。在沙特、科威特、厄瓜多尔等10多个国家进行了应用并得到了较好的效果,已成为中国石化国际钻井技术服务首选的配套装备。

1.1.7 钻井完井井下工具

围绕钻井提速提效目标,开展了高性能钻头、辅助破岩工具及等各类提速提效工具的研发^[24-25],主要包括PDC钻头、孕镶金刚石钻头、扭冲钻井工具、螺杆钻具、扩眼工具和取心工具等,部分已实现产业化,取得了显著的经济效益。此外,天然气水合物取心工具^[26-27]及膨胀管等工具的研发与应用也取得了突破与进展。

1) 金刚石钻头。川渝和新疆地区深部地层研磨性强、可钻性差, 导致钻速低、单趟钻进尺少, 为解决该问题, 研制了系列高效金刚石钻头, 增强了钻头对高研磨地层的适应性。如: 研制了个性化 PDC 钻头, 在川东北、塔里木、鄂尔多斯等地区都创造了进尺或钻速的新纪录; 研制了耐磨混合 PDC 钻头, 在西南地区 20 余口井进行了应用, 机械钻速平均提高 144%; 研制了孕镶金刚石钻头, 在西南地区应用取得了良好的效果, 平均机械钻速和单只钻头进尺分别提高 66.7% 和 84.0% 以上。

2) 辅助提速工具。研制了机械式及射流式旋冲工具、扭冲工具、PDC 恒扭矩工具、射流冲击器和水力振荡器等新型钻井工具, 能够辅助破岩和解决 PDC 钻头的粘滑问题, 同时减缓钻柱的有害振动冲击、降低钻井摩擦阻, 使钻进更平稳, 延长钻头和钻具的使用寿命, 机械钻速提高 30% 以上。

3) 井下动力钻具及非标准钻具。螺杆钻具突破了等壁厚定子内螺旋面加工技术的瓶颈, 具备不同规格型号螺杆钻具的设计制造能力。ZY28 和 ZY54 等非标准钻杆具有高抗扭、双台肩螺纹、小接头和大水眼优势, 解决了非常规井眼、小井眼开窗侧钻、深井、超深井使用常规钻杆施工时钻井液循环压耗大、钻井泵泵压高所导致的功耗大、钻井时效低和井下安全风险大等难题。

4) 扩眼工具。研发了机械式、双心式、压差式和液压式 4 个系列 11 种规格的扩眼工具, 形成了配套技术, 既可钻后扩眼, 也可随钻扩眼, 并在国内油田及缅甸、土库曼斯坦和土耳其等国家进行了应用。

5) 天然气水合物取心工具。成功研制出深海天然气水合物钻探取心工具, 形成了水合物取心现场配套施工工艺。在南海 LW3 区块 2 口井水深 1 310.00 m、泥线以下 100.00~123.50 m 完成 13 回次水合物取样作业, 其中 9 回次保压取样成功, 保压最高 12.01 MPa, 并完成了保压样品的带压转移^[26-27]。

6) 膨胀管。研发了膨胀套管、膨胀筛管和膨胀悬挂器等系列产品, 形成了全系列膨胀管配套技术^[28], 在套管补贴、裸眼复杂地层封堵、侧钻井、膨胀悬挂器完井、修井及膨胀筛管防砂等作业中成功应用。研制的大口径、高密封膨胀悬挂器使尾管固井套管重叠段由 200.00 m 缩短至 20.00 m, 在长井段套损井修复中, 与直连型套管结合, 解决了小间隙固井无法密封的问题。

1.1.8 油气井射孔优化技术

以提高射孔效能为目标, 在综合考虑油气藏条

件、地层特性和井筒环境的基础上, 形成了针对不同储集层环境的射孔优化技术^[29-30], 包括泵送桥塞及多级射孔联作技术、牵引器输送射孔技术、定方位射孔技术和动态负压射孔技术等。其中, 牵引器输送射孔技术将牵引器与多级射孔相结合, 实现了水平井牵引器输送射孔, 具有时效高、成本低等优点, 应用了近 30 口井, 均达到了提速提效的目的。动态负压射孔技术在引爆射孔弹的瞬间使孔道附近产生负压, 提高了孔道的导流能力, 降低了射孔对储层的伤害, 在胜利油田中低孔渗储层中应用百余口井, 产油量提高 50% 以上。

1.2 测井技术

重点攻关完善了裸眼测井^[31]、套管井测井和复杂储层测井解释评价技术。

1.2.1 裸眼测井技术

1) 超高温测井仪。研制了耐压 175 MPa、耐温 200 °C 的超高温测井仪, 在西北油田顺南、顺北区块 30 余口超深井进行了测井施工, 最高施工温度 208 °C、最大施工压力 169 MPa, 为深层油气藏勘探开发提供了测井技术保障。

2) 偶极声波远探测测井技术。实现了测井探测技术从近井壁到远井筒的突破, 探测距离达到 80.00 m, 大大提高了测井探测的范围, 可对井旁裂缝、溶蚀孔洞等地质异常体进行探测, 对选择“井旁甜点”和深化认识油气藏具有重大意义。该技术在塔河油田应用近 20 口井, 为碳酸盐岩、火成岩等复杂缝洞型油气藏的勘探开发提供了技术支撑。

1.2.2 套管井测井技术

针对不同测量条件、不同技术要求, 进行了相应生产测井仪器研发和测井技术的研究, 准确评价了单层的产能和剩余油等。

1) 瞬变电磁法过套管地层电阻率测井技术。该技术能过套管测量地层电阻率, 探测深度达到 2.00 m, 量程 0.2~100.0 $\Omega \cdot m$, 相对误差 10%, 根据测井资料能准确判断油层水淹状况、发现高含水层, 解决评价生产井地层剩余油饱和度的技术难题, 拓展套管井储层含油饱和度评价方法^[32]。

2) 井间电磁成像测井技术。利用该技术能够获得反映井间油藏构造和油气水分布的二维电阻率成像资料, 能直接测量井间地层的电特性^[33], 裸眼井探测距离达 500 m、单层金属套管井探测距离达 200 m。

3)水平井阵列式成像生产测井技术。该技术实现了小流量测量、水平井井下流态直观分析与产层评价,仪器外径43.0 mm,耐温150℃、耐压80 MPa。

1.2.3 复杂储层解释评价技术

完善了多极子阵列声波、元素俘获和核磁等成像测井资料处理解释方法,形成了不同类型复杂储层测井评价及选层方法,达到了勘探开发对复杂储层精细描述的要求。

持续完善具有自主知识产权的Logik和LogPlus解释评价软件平台。Logik在成像测井资料处理解释、生产测井等方面进行了功能扩展,平台稳定性不断提高,并在华北、中原和江汉等区域进行了应用。LogPlus以区域数据为依托,基于三维地质模型开展了单井、多井测井资料的处理解释,实现了从平面分析到三维分析的有机融合,将测井成果应用于地质环境描述和工程,并扩展了测井信息应用范围。

1.3 录井技术

通过重点技术攻关完善了不同地质条件和特殊钻井工艺条件下的录井资料采集和油气层综合解释评价技术^[34-35],为录井岩性识别和油气检测提供了技术手段,提高了解释的准确率。开发了多套信息软件,以适应油气勘探开发和录井信息化发展的要求。研发了以综合录井仪为代表的具有自主知识产权的录井装备,大幅度提高了录井效率和解释精度。

1)高端录井装备。研发了ZH-3综合录井仪和SinoWSL综合录井仪,开展了井下随钻钻井液采集处理、井下钻井液气液分离和井下气体分析等井下随钻气体检测关键技术研究,研发了实验样机,为录井由地面向地下延伸迈出一大步。

2)地质研究解释评价技术。通过研究页岩地层工程甜点和地质甜点评价参数的录井定量计算方法,建立了页岩储层品质和完井品质评价方法,形成了随钻地层录井精细评价方法;研发了具有自主知识产权的随钻地质导向系统,实现了基于三维地质建模、井眼轨迹和地层模型三维可视化的地质导向,形成了地层界面、靶点位置等有效判识模式,提高了井眼轨迹、随钻数据异常情况下决策的时效性。

3)录井信息技术。通过集中采集井场钻井、测井、录井和定向数据及资料,构建了以录井仪为核心的井场综合信息平台;通过一体化传输和后方基地端的多专业数据联合发布,搭建了井场远程实时发布平台;利用数据、图表、语音和视频等多种媒

介,搭建了前后方联动的涉及井筒多专业的一体化工作平台;通过建立面向数据库、应用系统等多目标的数据服务平台,为业务管理、专业应用和网络办公服务提供数据资源,实现数据共享,形成多业务域的协同工作平台。通过应用钻井作业视频监控系統,实现了生产区域视频监控,为各级管理人员加强井场安全监控、在线技术决策、设备远程维修指导提供了支持。

1.4 储层改造技术

通过技术攻关完善了水平井分段压裂技术、页岩气井水力压裂技术和碳酸盐岩深度酸压技术等储层改造技术。研制了水平井分段压裂工具,开发了适应不同类型储层的压裂液,为不同类型储层开发和难动用储层增产挖潜提供了技术支持。

1)水平井分段压裂技术。研制了等通径键槽式滑套、可反复开关滑套、易钻桥塞、可溶球座式压裂桥塞、水平裸眼井封隔器和水力喷射分段压裂工具等工具^[36-39],形成了裸眼封隔器滑套分段压裂、不限级数滑套分段压裂、桥塞-射孔联作分段压裂和水力喷射分段压裂等水平井压裂技术。目前在东胜气田、大牛地气田、塔河油田和涪陵页岩气田等油气田进行了应用,取得了较好的改造效果。

2)深层页岩气井高效压裂技术。针对深层页岩气井储层改造闭合压力高、裂缝打开难度较大和加砂困难等问题,通过攻关研究形成了控压技术、提高砂液比技术、提高裂缝复杂性技术和低摩阻滑溜水压裂液体系,并在涪陵、丁山、威荣等地区成功进行了多次3 500.00 m以深的深层页岩气井压裂作业。高效滑溜水压裂液体系具有低摩阻、低伤害、低成本和溶解速度快特点^[40],在焦石坝、丁山等地区已成功应用数十井次,降阻率最高达80%以上,满足了深层页岩气储层改造的要求。

3)碳酸盐岩储层深度酸压技术。针对塔河油田深井、超深井酸压改造难题,研制了耐温165℃的地面交联酸,研究优化了压裂液降滤失工艺及压裂液与酸液多级注入工艺,形成了碳酸盐岩储层深度酸压技术,提高了酸压深度和裂缝延伸长度,成为塔河油田增储上产的高效技术。

2 技术发展建议

技术创新永远是油气行业发展的核心推动力。一方面,在世界范围内,随着“互联网+”及“两化

融合”的快速发展,钻井完井、测井录井、储层改造等石油工程技术作为油气勘探开发的主要手段,正在朝着“自动化、信息化、智能化、实时化、集成化、绿色化”方向发展;另一方面,在一段时期内,深层油气、超深层油气和页岩油气等仍是勘探开发的重点,必须强化关键技术攻关,形成相应的配套石油工程技术,增强一体化服务能力。此外,干热岩、天然气水合物等非常规能源及深水油气的开发将是中国石化未来技术发展的另一个重要方向。

2.1 关键核心技术

1) 钻井完井技术。持续攻关超深层高研磨性地层钻井提速工具,配套自动化、智能化程度高的钻井装备,研制旋转导向仪器,研发多参数、近钻头、高温随钻测控仪器,完善井筒压力控制钻井技术,研发具有自主知识产权的油田化学助剂,形成特色钻井液、完井液、水泥浆及配套工艺。开展物联网、大数据、云计算等技术的应用,为实现多个作业单元的智能互联、井下和地面的实时监测及远程决策与控制提供技术手段,促进钻井数字化程度全面提高。进一步发展基于地震、钻井、测井、录井等井筒信息融合的钻井优化技术和钻井风险控制技术。

2) 测井录井技术。充分应用人工智能、云计算和大数据成果,建立适应 5G 硬件升级的综合一体化平台。在与地质、物探等多专业融合的同时,充分介入智能钻井,为快速钻井决策服务,实现地质工程一体化应用服务。重点解决 9 000.00 m 特深井及超高温超高压测井采集技术难题,开发复杂油气藏人工智能测井录井评价专家系统,增强特深层复杂井况与超高温高压环境下的服务能力,促进复杂岩性储层解释精度的持续提高。

3) 储层改造技术。发展全三维、精细化压裂设计技术,开展低成本高效压裂技术研究,优化压裂设备。进行压裂完井与生产一体化技术攻关,研制智能化压裂工具,研发耐高温、低伤害、可循环利用、环保型压裂液和超低密度高强度支撑剂。

2.2 集成配套技术

1) 深层油气藏勘探开发配套工程技术。完善深层储层识别评价技术、深层地层钻井提速技术及工具、复杂地层井壁稳定与防漏堵漏技术、高温高压深层油气藏测井技术及仪器、超深复杂地层录井及综合评价技术和超深碳酸盐岩高应力储层深度酸化压裂技术。

2) 页岩油气勘探开发配套工程技术。完善页岩气精细勘探及评价技术,深层页岩气长水平段水平井钻井提速技术,“井工厂”高效钻井完井技术,深层页岩气精细测井、定量录井及评价技术,高温高压油气藏大型压裂/酸压技术,常压及深层页岩气井压裂和重复压裂技术,长水平段水平井定向压裂技术,CO₂ 压裂技术,分段压裂试气一体化技术,井筒完整性及套损预防技术等。

3) 致密油气勘探开发配套工程技术。完善致密油气藏识别与评价技术、水平井“井工厂”优快钻井完井技术、速封堵漏技术、致密油气藏清洁压裂技术。进行致密油气藏精细导向钻井技术、长水平段水平井钻井提速技术、水平井调流控水技术、致密油气藏精细测井及评价技术、致密储层体积压裂和二次改造技术、致密储层增产技术攻关。研发致密砂岩自动化钻井系统。

4) 东部老油田效益开发配套工程技术。针对胜利油田、中原油田、华北油田等东部老油田特高含水期开发难度增大等问题,继续攻关研究难动用储量的高效开发钻井技术、提高采收率技术、高含水油气井二次完井技术、水平井三维可视化综合录井地质导向钻井技术、特高含水油气藏测井评价技术和化学驱采出液一体化综合处理技术。

5) 地热资源开发利用配套工程技术。进行砂岩回灌等地热资源开发技术研究,加大干热岩工程技术理论研究,通过科研攻关和现场示范工程,不断完善形成的干热岩开发技术。

6) 中深水油气勘探开发配套工程技术。加快技术储备,研发中深水钻机、水下钻机、水下采油装置、防喷器等钻井完井设备,进行双梯度钻井、控压钻井和尾管钻井等钻井完井技术研究,研究超低温钻井液、水泥浆和海水基压裂液等流体。

3 结束语

石油工程技术的创新发展,促使中国石化在页岩油气、深层油气、致密低渗透油气等多个领域实现了大突破、大发展,原油产量稳中有升,天然气产量快速增长。未来,中国石化将继续围绕油气勘探开发需求、准确把握钻井完井技术发展方向,按照“两个三年”、“两个十年”战略部署,在完善现有石油工程技术装备的基础上,强化关键技术攻关,着力于核心技术和装备研发,致力于技术集成配套,打造石油工程技术全产业链,全面提高石油工程技术

装备的自动化、信息化水平,为我国油气勘探开发能力和国际市场竞争力的提高提供强有力的保障。

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] 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): 1-13.
LU Baoping, DING Shidong. New progress and development prospect in shale gas engineering technologies of Sinopec[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(1): 1-13.
- [3] 刘彪, 潘丽娟, 易浩, 等. 顺北含辉绿岩超深井井身结构优化设计 [J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(3): 296-301.
LIU Biao, PAN Lijuan, YI Hao, et al. Casing program optimization of ultra-deep well with diabase reservoir in Shunbei Block[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(3): 296-301.
- [4] 蒋祖军, 肖国益, 李群生. 川西深井提高钻井速度配套技术 [J]. 石油钻探技术, 2010, 38(4): 30-34.
JIANG Zujun, XIAO Guoyi, LI Qunsheng. Technology to increase deep well drilling speed in Western Sichuan[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4): 30-34.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 赵小祥, 邢树宾, 毛迪, 等. 沙特 MTLH-1 井全过程欠平衡钻井技术 [J]. 石油钻探技术, 2010, 38(5): 60-64.
ZHAO Xiaoxiang, XING Shubin, MAO Di, et al. Whole process underbalanced drilling technology in Well MTLH-1 in Saudi Arabia[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(5): 60-64.
- [8] 许军富, 赵洪山, 于海叶, 等. 空气锤钻井技术在哈深 201 井火成岩地层的应用 [J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(6): 683-687.
XU Junfu, ZHAO Hongshan, YU Haiye, et al. Application of air hammer drilling technology in the igneous strata of Well Hashen 201[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(6): 683-687.
- [9] 孙泽秋, 金业权, 孙文俊, 等. 用于精细控压钻井的电动节流压力控制系统设计 [J]. 石油矿场机械, 2013, 42(4): 22-25.
SUN Zeqiu, JIN Yequan, SUN Wenjun, et al. Electric throttle pressure drilling control system research for the precise managed pressure drilling[J]. Oil Field Equipment, 2013, 42(4): 22-25.
- [10] 瞿佳, 李真祥. 元坝地区复杂深井新型井身结构与应用 [J]. 钻采工艺, 2012, 35(5): 40-44.
QU Jia, LI Zhenxiang. Design and application of the new casing program for complicated deep well in Yuanba Area[J]. Drilling & Production Technology, 2012, 35(5): 40-44.
- [11] 聂云飞, 吴仲华, 张辉, 等. 五级分支井技术在河 3-支平 1 井的应用 [J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(2): 13-16.
NIE Yunfei, WU Zhonghua, ZHANG Hui, et al. 5 levels multi-lateral technology application in Well He3-zp1[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(2): 13-16.
- [12] 唐波, 唐志军, 耿迎春, 等. 国内低渗透油气田高效开发钻井关键技术发展现状 [J]. 天然气工业, 2013, 33(2): 65-70.
TANG Bo, TANG Zhijun, GENG Yingchun, et al. Drilling and completion technologies for efficient exploitation of low-permeability oil & gas fields in China: a state-of-the-art review[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(2): 65-70.
- [13] 唐志军, 周金柱, 赵洪山, 等. 元坝气田超深水平井随钻测量与控制技术 [J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(2): 54-57.
TANG Zhijun, ZHOU Jinzhu, ZHAO Hongshan, et al. Measurement and control technology while drilling for ultra-deep horizontal wells in Yuanba Gasfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(2): 54-57.
- [14] 王智锋. MRC 近钻头地质导向系统总体设计与应用 [J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(4): 1-4.
WANG Zhifeng. Overall design and application of MRC near-bit geosteering system[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(4): 1-4.
- [15] 王中华. 国内外超高温高密度钻井液技术现状与发展趋势 [J]. 石油钻探技术, 2011, 39(2): 1-7.
WANG Zhonghua. Status and development trend of ultra-high temperature and high density drilling fluid at home and abroad[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(2): 1-7.
- [16] 于雷, 张敬辉, 李公让, 等. 低活度强抑制封堵钻井液研究与应用 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(1): 1-5.
YU Lei, ZHANG Jinghui, LI Gongrang, et al. Research and application of plugging drilling fluid with low-activity and high inhibition properties[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(1): 1-5.
- [17] 谢俊, 司西强, 雷祖猛, 等. 类油基水基钻井液体系研究与应用 [J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(4): 26-31.
XIE Jun, SI Xiqiang, LEI Zumeng, et al. Research and application of OBM-like water base drilling fluid[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2017, 34(4): 26-31.
- [18] 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): 1-11.
LIN Yongxue, ZHEN Jianwu. Research and application of deep shale gas water based drilling fluid technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(2): 1-11.
- [19] 林永学, 王显光, 李荣府. 页岩气水平井低油水比油基钻井液研制及应用 [J]. 石油钻探技术, 2016, 44(2): 28-33.
LIN Yongxue, WANG Xianguang, LI Rongfu. Development of oil-based drilling fluid with low oil-water ratio and its application to drilling horizontal shale gas wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(2): 28-33.

- [20] 王毅, 彭志刚, 徐浩然. 水平井复合水泥浆体系研究及应用 [J]. 钻采工艺, 2011, 34(2): 103-105.
WANG Yi, PENG Zhigang, XU Haoran. Research and application of composite cement slurry system for horizontal wells[J]. *Drilling & Production Technology*, 2011, 34(2): 103-105.
- [21] 刘学鹏, 张明昌, 冯明慧, 等. 复合空心微珠低密度水泥浆的研究与应用 [J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(6): 39-41.
LIU Xuepeng, ZHANG Mingchang, FENG Minghui, et al. Research and application of composite hollow microbead low density cement slurry[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2014, 36(6): 39-41.
- [22] 马明新, 杨海波, 徐鑫. 液压扶正器在胜利油田非常规油井固井中的应用 [J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 71-74.
MA Mingxin, YANG Haibo, XU Xin. Application of hydraulic centralizer in unconventional oil well cementing of Shengli Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(1): 71-74.
- [23] 马清明, 江正清, 董怀荣. 海洋钻井平台钻柱自动化处理防撞控制研究 [J]. 石油矿场机械, 2014, 43(7): 1-4.
MA Qingming, JIANG Zhengqing, DONG Huairong. Research on anti-collision of drill strings automatic treatment system for offshore drilling platform[J]. *Oil Field Equipment*, 2014, 43(7): 1-4.
- [24] 明瑞卿, 张时中, 王海涛, 等. 国内外水力振荡器的研究现状及展望 [J]. 石油钻探技术, 2015, 43(5): 116-122.
MING Ruiqing, ZHANG Shizhong, WANG Haitao, et al. Research status and prospect of hydraulic oscillator worldwide[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(5): 116-122.
- [25] 赵建军, 崔晓杰, 赵晨熙, 等. 高频液力扭力冲击器设计与试验研究 [J]. 石油化工应用, 2018, 37(2): 5-10.
ZHAO Jianjun, CUI Xiaojie, ZHAO Chenxi, et al. Design and experimental research on high frequency hydraulic torsional impactor[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2018, 37(2): 5-10.
- [26] 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.
- [27] 裴学良, 任红, 吴仲华, 等. 天然气水合物岩心带压转移装置研制与现场试验 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(3): 49-52.
PEI Xueliang, REN Hong, WU Zhonghua, et al. Research and field test of a pressure-stabilizing transfer device for natural gas hydrate samples[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(3): 49-52.
- [28] 韩来聚. 胜利油田钻井完井技术新进展及发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2017, 45(1): 1-9.
HAN Laiju. The latest progress and suggestions of drilling and completion techniques in the Shengli Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(1): 1-9.
- [29] 赵旭. 水平井变密度射孔技术研究 [J]. 测井技术, 2016, 40(1): 122-126.
ZHAO Xu. Research on variable density perforating technology of horizontal well[J]. *Well Logging Technology*, 2016, 40(1): 122-126.
- [30] 任闽燕, 田玉刚, 张峰, 等. 胜利油田水平井射孔参数优化技术 [J]. 测井技术, 2013, 37(4): 441-444.
REN Minyan, TIAN Yugang, ZHANG Feng, et al. Perforating parameter optimization technique for horizontal well in Shengli Oilfield[J]. *Well Logging Technology*, 2013, 37(4): 441-444.
- [31] 邹顺良, 杨家祥, 胡中桂, 等. FSI 产出剖面测井技术在涪陵页岩气田的应用 [J]. 测井技术, 2016, 40(2): 209-213.
ZOU Shunliang, YANG Jiaxiang, HU Zhonggui, et al. Application of FSI production profile logging technique in Fuling Shale Gas Field[J]. *Well Logging Technology*, 2016, 40(2): 209-213.
- [32] 朱留方, 臧德福, 沈永进, 等. 瞬变电磁测井原理研究 VI: 过套管电阻率 [J]. 测井技术, 2016, 40(1): 28-32.
ZHU Liufang, ZANG Defu, SHEN Yongjin, et al. Theory of transient electromagnetic logging VI: through-casing resistivity[J]. *Well Logging Technology*, 2016, 40(1): 28-32.
- [33] 臧德福, 郭红旗, 晁永胜, 等. 井间电磁成像测井系统分析与研究 [J]. 测井技术, 2013, 37(2): 177-182.
ZANG Defu, GUO Hongqi, CHAO Yongsheng, et al. Analysis and research of cross-well electromagnetic imaging logging system[J]. *Well Logging Technology*, 2013, 37(2): 177-182.
- [34] 李一超, 王志战, 秦黎明, 等. 水平井地质导向录井关键技术 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5): 620-625.
LI Yichao, WANG Zhizhan, QIN Liming, et al. Key surface logging technologies in horizontal geosteering drilling[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(5): 620-625.
- [35] 陆黄生. 综合录井在钻井工程中的应用现状与发展思考 [J]. 石油钻探技术, 2011, 39(4): 1-6.
LU Huangsheng. Current technology situation and developing trend of mud logging's application in drilling engineering[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(4): 1-6.
- [36] 薛承瑾. 页岩气压裂技术现状及发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2011, 39(3): 24-29.
XUE Chengjin. Technical advance and development proposals of shale gas fracturing[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(3): 24-29.
- [37] 赵传伟, 李云, 李国锋, 等. 基于 Taguchi 方法的计数式全通径压裂滑套优化设计 [J]. 石油钻探技术, 2017, 45(1): 97-103.
ZHAO Chuanwei, LI Yun, LI Guofeng, et al. Design optimization of full bore stimulation sleeves with ball drop counting using the Taguchi method[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(1): 97-103.
- [38] 何同, 彭汉修, 吴晓明, 等. 全复合材料易钻桥塞研制与应用 [J]. 特种油气藏, 2017, 24(4): 166-170.
HE Tong, PENG Hanyu, WU Xiaoming, et al. Development and application of drillable bridge plug made by composite materials[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2017, 24(4): 166-170.
- [39] 魏辽, 马兰荣, 朱敏涛, 等. 大通径桥塞压裂用可溶解球研制及性能评价 [J]. 石油钻探技术, 2016, 44(1): 90-94.
WEI Liao, MA Lanrong, ZHU Mintao, et al. Development and performance evaluation of dissolvable balls for large borehole bridge plug fracturing[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, 44(1): 90-94.
- [40] 魏娟明, 刘建坤, 杜凯, 等. 反相乳液型减阻剂及滑溜水体系的研发与应用 [J]. 石油钻探技术, 2015, 43(1): 27-32.
WEI Juanming, LIU Jiankun, DU Kai, et al. The development and application of inverse emulsified friction reducer and slickwater system[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(1): 27-32.