

大庆油田钻井完井技术新进展及发展建议

杨智光

(中国石油大庆钻探工程公司,黑龙江大庆 163453)

摘 要:“十二五”期间,大庆油田针对深层火山岩砂砾岩、致密油水平井、特高含水油田调整井和超浅稠油水平井等钻完井技术难题,在复杂地层钻完井技术、随钻测量与控制技术、深井提速提效关键技术与工具、钻井液技术和固井技术等方面开展了技术攻关,钻完井技术能力和水平得到了长足的进步和发展,并形成了具有大庆油田特色的钻完井配套技术,基本满足了大庆油田钻井提速、提效和降本的技术需求。“十三五”期间,为了满足大庆油田深部气藏和“三低”油田经济有效勘探开发的需求,实现年产油气当量 $4\,000 \times 10^4$ t 持续稳产的战略目标,需在深部难钻地层、复杂区块调整井和非常规油气资源等 3 个领域以及前沿高端技术方面开展攻关研究,持续推进大庆油田钻完井技术的进步和发展,为大庆油田健康可持续发展提供钻完井技术保障。

关键词: 钻井; 完井; 技术进展; 发展建议; 大庆油田

中图分类号: TE21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2016)06-0001-10

The Latest Proposals for the Advancement and Development of Drilling and Completion Technology in the Daqing Oilfield

YANG Zhiguang

(Daqing Oilfield Drilling Engineering Company, Daqing, Heilongjiang, 163453, China)

Abstract: In consideration of technical challenges in the drilling and completion of deep volcanic rock and glutenite, tight oil horizontal wells, infill wells in high water cut oilfield and ultra-shallow horizontal wells for heavy oil development, the Daqing Oilfield Company conducted a series of research programs during the 12th Five-Year Plan period. The programs relate to technologies for drilling and completion in complex formations, MWD and control technology, key technologies and instruments for high-speed and high-efficiency drilling of deep wells, drilling fluid and cementing technology, sophisticated drilling and completion technologies. All were conducted with the unique characteristics of the Daqing Oilfield to satisfy the field's unique technical demands in order to improve the drilling rate and efficiency as well as lower costs. These technologies have promoted the development of drilling and completion technologies significantly. During the 13th Five-Year Plan period, more research will be carried out in following the three areas: deep hard-to-drill formations, in-fill wells in complex blocks and unconventional hydrocarbon resources, to develop state-of-the-art technologies, in order to meet the needs of economic and high-efficiency development for deep reservoirs and those oilfields with low porosity, low permeability and low saturation, and achieve the strategic objectives of annual $4\,000 \times 10^4$ t equivalent hydrocarbon production. In addition, these technologies may continuously promote the advancement and development of drilling and completion technologies in the Daqing Oilfield, and to provide necessary technical supports for healthy and sustainable development of the Daqing Oilfield.

Key words: drilling; completion; technology development; development proposal; Daqing Oilfield

大庆油田作为我国最大的陆地油田,已勘探开发近 60 年,自 1976 年原年产量首次达到 $5\,000 \times 10^4$ t 后,实现连续 27 年年产原油 $5\,000 \times 10^4$ t 以上,自 2003 年开始连续 12 年年产原油 $4\,000 \times 10^4$ t 以上,主力油田采收率突破 50%,比世界同类油田高出 10~15 个百分点,为维护国家石油战略安全、推进中国石油世界水平综合性国际能源公司建设和促

收稿日期: 2016-09-20。

作者简介: 杨智光(1966—),男,辽宁绥中人,1990年毕业于大庆石油学院钻井工程专业,2008年获大庆石油学院油气井工程专业博士学位,教授级高级工程师,中国石油集团公司钻井咨询高级专家,主要从事钻完井技术研究与管理工作。系本刊编委。E-mail: yangzhiguang@cnpc.com.cn。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大专项“大庆油田原油 4000 万吨持续稳产关键技术研究”(编号:2011E-1214)资助。

进地方经济社会发展做出了重大贡献。钻完井技术作为石油勘探开发的关键技术手段,在油田开发的每个阶段均发挥了重要的作用。特别是“十二五”期间,大庆油田针对深部地层油气勘探开发困难、外围区块钻井难度大、钻井效益差等难题,开展了钻井完井技术攻关,推动了钻完井技术的进步和提升,逐步形成了复杂地层钻井技术、随钻测量与控制技术、深井提速提效关键技术与工具、钻井液和固井配套技术,实现了钻井提速、提质和提效,基本上满足了大庆油田油气勘探开发的需求。

1 钻完井技术主要进展

1.1 复杂地层钻井技术

1.1.1 深层火山岩砂砾岩钻井技术

庆深气田是大庆油田深层天然气勘探开发的重点,主要储层是营城组火山岩和砂砾岩气藏,钻井过程中面临地层硬(可钻性级值 >7)、温度高(井底温度 $>150\text{ }^{\circ}\text{C}$)、裂缝发育(垂直、水平等多种裂缝并存)等难题。“十二五”期间,大庆油田依托中国石油天然气股份有限公司重大专项“大庆油田原油4 000万吨持续稳产关键技术研究”之课题十四“复杂结构井钻完井技术”,提出了以“引进试验为辅、自主研发为主”的研究思路,对超深超高温油气井、导眼侧钻水平井和深层多分支水平井等钻井技术进行了重点攻关,并研制了液动旋冲提速工具、涡轮钻具、专用PDC钻头和气体/欠平衡钻井系统等提速提效设备与工具,形成了大庆油田深层火山岩砂砾岩钻井技术,有效提高了钻井速度,降低了钻井成本^[1-5]。“十二五”期间,庆深气田共钻井120余口,与“十一五”期间的钻井效果相比,在平均井深增加142.37 m的情况下,平均机械钻速提高38.29%,平均钻井周期缩短28.69 d,平均建井周期缩短28.41 d。其中,古龙1井完钻井深6 320.00 m,井底最高温度 $253\text{ }^{\circ}\text{C}$,创松辽盆地油气井井深最深和温度最高2项纪录。

1.1.2 致密油水平井钻井技术

随着油气资源品质劣质化、油气目标复杂化等问题的不断加剧,尤其是随着勘探开发逐步面向致密油、致密气和页岩油等非常规资源,石油工程技术面临着新的挑战与发展机遇。大庆油田依托中国石油天然气股份有限公司重大专项“大庆探区非常规

油气勘探钻完井技术研究”,深入开展了井身结构优化、专用PDC钻头优化设计、旋转导向系统应用、水力振荡器研制和漂浮下套管等多项技术攻关,形成了大庆油田致密油水平井钻井技术^[6-7],并先后顺利钻成了垣平1井、齐平1井等100余口致密油水平井,实现了致密油储层的经济有效开发。其中,垣平1井完钻井深4 300.00 m,水平段长2 660.00 m,创当时国内陆地油田水平井水平段最长纪录^[8]。

1.1.3 特高含水油田调整井钻完井技术

经过多年的调整开发,大庆油田长垣主力油田进入特高含水开发阶段,综合含水率达到94%,调整井钻井中面临着诸多新问题,其中砂岩层水洗严重导致井径异常扩大、泥岩层浸水引发缩径井塌等井下故障尤为突出。大庆油田利用砂岩层渗流数学模型,开发了井径易扩大区域预测软件,结合浸水泥岩层电性曲线及高压层压力计算方法,建立了危害体预测模型,并采取了砂岩井径易扩大区、泥岩浸水区安全钻井配套技术措施,形成了特高含水油田调整井钻完井技术。“十二五”期间,在砂岩井径易扩大区钻井3 735口、泥岩浸水区钻井3 866口,与“十一五”期间钻井情况相比,井径扩大发生率下降了61.9%,泥岩浸水引发的井下故障发生率下降了54.6%,为特高含水油田调整井安全钻进提供了保障。此外,针对调整井加密过程中地面条件限制问题,大庆油田开展了密井网井身结构和井眼轨道设计、井眼轨迹控制和防碰绕障等技术攻关,形成了密井网大平台定向井钻井技术,并建成了亚洲最大陆基钻井平台,在面积 0.025 km^2 区域内钻井48口。

1.1.4 超浅稠油水平井钻井技术

黑帝庙油田葡浅12区块是大庆油田稠油热采的重点区块,具有井网密度大、埋藏浅、地层胶结疏松和原油黏度高等特点,采用常规直井或斜井开发时,储层泄油面积相对较小,无法实现稠油的有效驱替。根据国内其他浅层水平井钻完井施工经验,浅层水平井钻井时需要应用加压装置等特殊工具,导致钻井费用增加。为了降低施工难度和钻井成本,大庆油田深入开展了砂体精细预测、井眼轨道设计优化、钻井参数优化、管柱下入能力分析和井壁稳定性强化等技术研究^[9],形成了砂体精细预测、管柱受力分析和提高井眼稳定性等3项关键技术,并通过相关配套技术措施的完善与应用,形成了超浅稠油水平井钻井技术,实现了低成本条件下超浅稠油的

有效开发。截至目前,先后顺利钻成了葡浅 12-平 1 井等 8 口井,其中最浅井垂深为 258.52 m,水垂比达到 2.71,创造了当时国内陆地油田稠油水平井垂深最浅的纪录。

1.2 随钻测量与控制技术

1.2.1 随钻测井技术

针对目标油藏设计与实际钻探存在误差及大庆外围油田油层薄、小断块构造特点给井眼轨迹控制带来的困难,大庆油田依托中国石油天然气股份有限公司重大专项“大庆油田原油 4 000 万吨持续稳产关键技术研究”,将中控、伽马和电阻率 3 个模块进行集成一体化设计,改变了以往的三段式连接结构(较引进 LWD 仪器减少 2 处滑环硬连接,长度缩短 2.60 m),研制出了机械结构紧凑、电路集成度高、测点距钻头近和利于地质导向的 DQ-LWD 仪器,形成了地面识别和解释技术,能够依据获取的实时数据,及时辨别地层变化并进行井眼轨迹调整,从而提高了油层钻遇率^[10]。“十二五”期间,大庆油田累计加工制造 DQ-LWD 仪器 39 串,先后在 324 口水平井进行了成功应用,累计进尺 24×10^4 m,平均油层钻遇率 66.8%,与同区块应用国外 LWD 仪器所钻水平井相比,平均油层钻遇率提高了 7.0 百分点。

1.2.2 垂直钻井技术

自动垂直钻井技术在易斜区块纠斜、防斜、打快方面技术优势明显^[11-12],为了解决海拉尔、方正等油田或区块钻井过程中的井斜问题,大庆油田研制了 DQCZ-1 型自动垂直钻井系统。该系统通过测量单元、控制单元、执行单元及反馈单元之间的协同工作实现自动测斜、井眼轨迹控制、自动纠斜及井下工况参数上传,必要时由地面系统对井下工具下传指令实现井眼轨迹控制的人为干预,形成带有人工控制功能的大闭环控制系统。该系统先后在海拉尔油田、方正区块 4 口井的防斜钻进中进行了应用,获得良好的纠斜、防斜和打快效果。例如,海拉尔油田楚 9 井应用该系统钻进 1 108.00~1 528.00 m 井段南屯组地层,井斜角从 3.13°降至 0.45°,平均机械钻速从 1.80 m/h 提高至 3.27 m/h。

1.2.3 旋转导向钻井技术

针对滑动导向钻井中存在的导向精度差、机械

钻速低和井眼轨迹不平滑等问题,大庆油田研制了旋转导向钻井系统。该系统采用静态偏置推靠钻头式设计方案,集成了钻井液脉冲发电、工程及地质参数测量、近钻头井斜测量、闭环导向控制和参数实时上传等功能,具有井下工具内部的闭环控制系统、井下工具与地面监控系统之间的双向通讯控制环路,通过 2 组通信及控制环路的配合工作,能够按照设计井眼轨道进行自动导向,必要时也可以实现人为控制,以满足智能化自动导向钻井作业及随钻地质导向作业的双重需要。旋转导向钻井系统先后在大庆油田古 693-98-平 94 井、古 693-104-平 112 井等 4 口水平井水平段钻井中进行了试验,单次下井最长钻进时间 108 h,进尺 228.40 m,累计钻进时间 197 h,进尺 510.00 m,造斜率最高达到 6°/30m。

1.2.4 随钻地层压力测试技术

2009 年,大庆油田研制了随钻地层压力、温度测试工具,并建立了一整套随钻数据双向传输的软硬件平台,形成了随钻地层压力测试技术,改变了常规油气井完钻后应用电缆式 RFT/MDT 测试地层压力的方式,可以随钻获取地层压力、温度和流量,实现为钻井工程和油藏地质工程实时提供基础数据的目的^[13]。在大庆油田密井网条件下,随钻测量的环空压力对同区块的首钻井和加密井的钻井设计具有指导意义^[14];在复杂区块不清楚邻井地层压力的情况下,可实现地层压力的随钻检测,从而有效减少井下故障的发生;在大庆油田老区调整井后期注水开采地层渗透率发生变化的情况下,可以随钻对地层渗透率进行重新评估。随钻地层压力测试技术在大庆油田 50 口井进行了应用,单支仪器在井下累计工作时间达到了 860 h,井下测试最高压力 47.02 MPa,最高温度 159.7 °C,地层有效封隔率达到 85% 以上。

1.2.5 电磁波随钻测量技术

2013 年,大庆油田针对常规 MWD 在应用中存在的易被冲蚀和堵塞,维修成本高和在高含砂、高密度或添加堵漏材料的钻井液中无法应用等难题^[15-16],基于电磁波无线传输技术和井下智能电隔离技术突破,成功研制了电磁波无线测量传输系统,形成了一套适应大庆油田地层特性的电磁波测量传输工艺技术,解决了常规 MWD 存在的问题,缩短了建井周期,降低了钻井成本。目前,大庆油田已完成 13 套仪器的生产,并先后在 50 余口井进行了应

用,适应地层电阻率为 $0.6 \Omega \cdot \text{m}$ 以上,最大传输深度达到了 3 250.00 m,解码成功率达 90% 以上。研制的高效智能供电开关,使锂电池组的使用效率达到 90% 以上。

1.3 深井钻井提速提效关键技术与工具

1.3.1 气体钻井技术

“十一五”末,大庆油田开展了气体钻井研究与实践,针对泉头组和登娄库组泥页岩井壁失稳引起的井下故障,进行了地层出水预测及监测、雾化/泡沫钻井液、吸水剂研制等技术攻关,提高了地层出水的应对能力,延长了气体钻井进尺。同时,创新应用“内喷外侵”气液转化技术,满足了转换钻井液后井壁稳定的要求。截至 2015 年底,大庆油田在松辽深层 29 口井钻井中应用了气体钻井技术^[17-19],累计进尺 20 595.00 m,平均单井进尺 710.17 m,平均机械钻速较常规钻井同比提高 4 倍以上。例如,古深 3 井创造了两趟钻进尺 1 208.00 m、钻井周期 18 d 的纪录,钻井周期缩短 100 d,节约钻头 15 只;徐深 35 井在地层出水量大于 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ 情况下应用雾化/泡沫钻井技术,安全钻进 627.00 m。

1.3.2 精细控压钻井技术

针对深井钻井存在的钻井液漏失及地层压力复杂等问题,大庆油田通过自动控制原理研究和水力学计算模型优化分析,应用多级节流工艺,优化设计了两翼双联立体式结构及双通道自动节流管汇,建立了四参数(压力、开度、流量和密度)回压计算模型,自主开发了控压钻井软件,形成了以 MATLAB、PLC、RTU 和数据板卡等为核心的自动闭环反馈控制系统,实现自适应、快速响应及精确压力控制,研制了一套精细控压钻井装备,形成了适合大庆油田地质特点的精细控压钻井技术,其压力控制精度为 $\pm 0.20 \text{ MPa}$,钻井液当量密度调整能力为 $0.1 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。徐深 7-1 井在钻进 3 700.00~3 948.00 m 井段营城组地层时应用了精细控压钻井技术,有效降低了井漏、溢流等钻井作业风险,确保了复杂井段安全钻进,实现了低渗透油气藏的有效保护,发现气测显示地层 8 层。

1.3.3 高效钻头的研制与应用

1) 火山岩砂砾岩专用 PDC 钻头。针对大庆油田深部地层泉二段至沙河子组地层岩石坚硬且研磨性强,导致单只钻头进尺少、钻头寿命短、机械钻速

低的问题,基于各区块岩石力学性能分析,采用国际一流的高性能 PDC 切削齿,并对钻头冠部曲线和刀翼参数等进行了优化设计,研制出新型 PDC 钻头,与原 Q635 型 PDC 钻头相比,布齿密度提高 46%,钻头力平衡性更高且更稳定;与常规 PDC 钻头相比,破岩能力和使用寿命都大幅提高。该型 PDC 钻头在 3 口井进行了现场试验,累计进尺 1 153.83 m。其中,该型 PDC 钻头在徐深 1-平 4 井累计使用 132 h,进尺 365.00 m,机械钻速 2.77 m/h,与该井上一趟钻相比,机械钻速提高了 532%,提速效果显著。

2) 牙轮+PDC 复合钻头。针对在钻进深层含砾及较硬夹层的难钻地层时机械钻速低、钻头磨损严重的问题,大庆油田研制了牙轮和 PDC 钻头相结合的高效复合钻头。该钻头采用了攻击性较强的浅内锥角及短圆弧冠部曲线,并设计了平头式牙轮和 PDC 刀翼,采用了高耐磨镀银轴承、端面渗氮及表面堆焊合金等先进工艺。复合钻头牙轮齿预破碎岩石形成齿坑,再由 PDC 齿刮削破岩,从而提高了钻头破岩能力和寿命。该复合钻头在双 66 井进行了现场试验,进尺 102.90 m,平均钻速 3.11 m/h,与邻井相比,进尺提高了 153%,钻速提高了 196%;与国外公司的复合钻头相比,进尺提高了 44%,钻速提高了 52.5%,成本降低 50% 以上。

1.3.4 钻井提速提效工具的应用

1) 液动旋冲工具。针对目前难钻地层机械钻速低的问题,大庆油田研制了由钻井液驱动产生高频周向振动以辅助钻头破岩的液动旋冲工具,使破岩方式由普通切削转换成周向高频冲击切削破岩,从而消除了“黏滑现象”,提高破岩效率,并保护钻头;同时,液动旋冲工具能够形成高频水力脉冲射流,提高岩屑运移效率,减少井底岩屑重复切削,从而提高机械钻速^[20-21]。大庆油田已研制出适合井眼直径 152.4~311.1 mm 的 4 种规格液动旋冲工具,在大庆、吉林、内蒙、河南、新疆塔东等多个油田或地区累计应用 170 井次,进尺超过 38 000.00 m。其中,该工具在徐深 6-306 井 2 430.00~3 431.00 m 井段的应用中,单趟钻进尺 1 001.00 m,创造了该工具单趟钻进尺最高纪录,平均机械钻速 6.18 m/h,是邻井相同井段平均机械钻速的 2.56 倍。

2) 水平井、定向井专用液动旋冲工具。针对常规液动旋冲工具尺寸较长、振动频率高、无法配合螺杆和定向仪器在深水平井应用的问题,大庆油田研制了水平井、定向井专用液动旋冲工具,创新设计了

单级叶轮动力机构和自扶正冲击系统,使工具长度由 1.66 m 缩短至 0.80 m。同时,设计带过流孔的中空轴,减少钻井液流经冲击系统的流量,以降低叶轮转速,使冲击机构的振动频率降低 12.5%,解决了工具振动对定向仪器工具面的影响。该工具已在 8 口井进行了成功应用,共使用 21 套工具,累计进尺 3 580.00 m,平均机械钻速 2.50 m/h,与邻井相比,单趟钻进尺提高 60%以上,平均机械钻速提高 30%以上。其中,该工具在达深斜 23 井应用中,单套工具进尺 365.00 m,平均机械钻速 5.13 m/h,创该工具钻速最高纪录。

3) 水力振荡器。针对水平井钻井过程中摩阻大、托压等问题,研制了 DQS-178 型水力振荡器,可将钻井液的液能转化为机械能,带动钻柱在轴线方向高频振动,将钻柱与井壁之间的静摩擦力转变为动摩擦力,从而降低摩阻,减小托压及井下故障的发生,提高机械钻速,并保护钻头^[22-23]。该工具在 31 口井进行了现场应用,应用井深 1 014.00~2 491.00 m,累计进尺 14 811.00 m,平均单井进尺 477.80 m,平均机械钻速 6.28 m/h,与未使用该工具的邻井相比,钻速提高 30.8%,钻进摩阻平均降低 20~30 kN,降摩减阻及提速效果显著。

4) 涡轮钻具。针对深井极硬、高研磨地层钻井速度慢的技术难题,大庆油田设计了耦合均载止推轴承结构、高稳定转子扶正系统及高效涡轮定转子,自主研制了 DQW-178 型涡轮钻具。该工具通过内部多级高效涡轮叶片将钻井液的液压能量转化为旋转机械能,驱动钻头破岩^[24-25]。该涡轮钻具已累计应用 11 口井(20 余趟钻),累计进尺 2 403.83 m,平均机械钻速 1.33 m/h,有效提高了深井极硬、高研磨性地层的钻井速度。其中,该工具在宋深 11 井 3 460.00~3 923.00 m 井段营城组至沙河子组地层钻进中,一趟钻进尺 459.70 m,相当于 7.5 只牙轮钻头的进尺,纯钻时间 205.22 h,平均机械钻速 2.24 m/h,与常规牙轮钻头相比,钻速提高 71%,钻井周期缩短 15 d,创井下循环工作时间 260 h 的纪录,起钻后该工具仍能正常应用。

5) 系列套管开窗工具。为满足老井及低产井剩余油气挖潜、提高采收率、降低开发成本的需求,大庆油田研制了 DQKC 系列套管开窗工具,设计了液力卡瓦机构及斜向器悬挂机构,具有结构简单、安全可靠等优点,并且能够在高钢级(P150)套管及水平段进行套管开窗侧钻。此外,为降低勘探开发成本和便于处理井下故障,在套管开窗工具的基础上

又研制了裸眼侧钻工具。截至目前,DQKC 系列套管开窗工具已在大庆油田 36 口井的套管开窗施工中进行了应用,成功率达到 100%。

1.4 钻井液技术

1.4.1 抗高温水基钻井液技术

大庆油田深部地层油气埋藏深、岩性复杂、微裂缝发育、胶结性差,钻井过程中常发生井壁剥落、坍塌和漏失等井下故障,且钻井周期长、井底温度高,易导致钻井液性能发生变化。为此,大庆油田通过分子结构设计,自主合成了抗温达 220℃、黏度保留率在 50%以上的多元共聚物类降滤失剂和具有网膜护壁作用的井壁强化剂 GMW,通过包被剂、高效环保润滑剂等配套处理剂的优选,形成一套抗温 220℃、封堵能力强的水基钻井液体系,并在徐深 21-平 1 井、徐深 9-平 3 井等 20 余口深水平井进行了应用。其中,徐深 7-平 1 井完钻垂深 3 761.90 m,水平段长 1 215.00 m,成为大庆油田应用水基钻井液完成的水平段最长的深层气井。

1.4.2 高性能水基钻井液技术

大庆油田致密油藏姚家组地层黏土矿物含量高,极易水化分散;青山口组地层微裂缝极为发育,且黏土矿物中伊利石含量在 60%以上,应用水基钻井液钻进过程中易水化及层间散裂,井壁失稳问题严重。虽然油基钻井液性能优异,可以满足钻进致密油层时井壁稳定的需要,但其成本高、环保压力大,且后期处理困难。为此,大庆油田通过基团分析及分子结构设计^[26-28],分别研制了具有高浓度胺基基团的高效泥页岩抑制剂 DQHIB-I 和具有环保性能的植物油基高效液体润滑剂 LRH。抑制剂 DQHIB-I 质子化铵离子可嵌入晶层间,通过静电吸附和氢键作用将黏土片层束缚在一起^[29],从而起到抑制黏土水化膨胀、稳定井壁的作用。以抑制剂 DQHIB-I 和润滑剂 LRH 为核心处理剂,结合降滤失剂、高效封堵防塌剂等配套处理剂的优选,形成了具有强抑制强封堵高润滑性的高性能水基钻井液^[30-31]。该钻井液在 30 余口致密油水平井进行了现场应用,钻完井作业均顺利完成,无任何井下故障发生,有效解决了应用水基钻井液钻进致密油水平井泥页岩地层时易井壁失稳、摩阻大、易形成岩屑床等难题。其中,龙 26-平 25 井应用高性能水基钻井液顺利完成长达 2 033.00 m 水平段的钻井施工,创

造了大庆油田水基钻井液钻进水平段的最长纪录。

1.4.3 防漏堵漏技术

针对徐家围子、南二三区和英台油田不同区块的地质特点及钻井液漏失情况,研制了可真实模拟地层裂缝尺寸、形态的新型微裂缝封堵评价装置,并建立了相应的封堵评价方法,在为防漏堵漏机理研究提供可靠评价手段的同时,形成了有针对性的防漏堵漏技术。以自主研发的SZ-I型随钻防漏堵漏剂为核心的防漏技术,具有封堵范围广、适应性强和封堵率高等特点^[32],在徐深903-平1井等多口重点井进行了成功应用,防漏成功率达到100%;研制的延迟膨胀堵漏剂体积膨胀5倍以上,膨胀时间延迟1~5 h,抗温达160℃,具有弹性变量大、承压能力强和堵漏成功率高等优点,并在徐深6-302井成功应用,与邻井徐深5-103相比,该井钻井液漏失量减少超过1 000 m³,经济效益显著。

1.5 固井技术

1.5.1 深层气井固井技术

大庆油田深层气井井深达5 500.00 m,地温梯度为4.0℃/100m,气层富含CO₂伴生气(最高占产气量的90%),这对固井水泥浆的抗高温、防气窜和防腐性能提出了很高的要求^[33-34]。为此,大庆油田开展了深层气井固井关键技术研究:利用聚合物相对分子质量大小和窄分布控制技术,自主研发了中高温缓凝剂、降滤失剂和稳定剂3大类6种产品,抗温可达200℃,各项性能达到国外同类产品水平^[35];针对CO₂对套管及水泥环的腐蚀问题,根据水质、温度、CO₂分压和流速等地层基本情况优选套管材料及型号,研制及优选了超细填充材料、有机聚合物和无机硅质材料等水泥外加剂,基本解决了CO₂腐蚀问题;合成了具有高温悬浮能力的表面活性剂,研制了冲洗、隔离一体化的双效前置液,其密度1.10~1.80 g/cm³;研制了抗高温低密度水泥浆,其具有抗温性好、常温条件下凝结时间短和水泥石抗压强度高特点,适应大温差长封固段固井。大庆油田已完成12口深层气井的固井施工,一次固井成功率100%,固井质量合格率100%,对深层天然气的高效开发起到很好的技术支撑作用。

1.5.2 致密油水平井固井技术

针对致密油水平井套管柱下入、居中困难,水平

段环空顶替效率低,水泥浆候凝期间易出现水窜等问题,大庆油田开展了套管下入、冲洗顶替和水泥浆游离液控制等固井关键技术研究。研制了漂浮短接、旋转引鞋等系列水平井漂浮下套管工具,目前已在200余口井进行现场应用,满足了长水平段水平井套管下入的要求。其中,龙26-平25井完钻井深4 045.00 m,垂深1 833.00 m,最大井斜角91.11°,水平段长2 033.00 m,创该工具水平段最长应用纪录。建立了流体数值模拟分析软件,模拟了井径扩大率、套管偏心度、水力参数、流变参数、井斜角等诸多因素对水平井顶替效率的影响,为现场固井施工优化提供了指导。研制了水泥浆游离液控制剂和增韧剂,提高了水泥环密封效果。以“井眼净化、安全下入、扶正居中、高效顶替、理想填充”为固井施工原则,形成了一套满足大庆油田致密油水平井固井要求的综合固井技术,现场应用效果良好,水平段固井优质率提高了5个百分点。

1.5.3 调整井固井技术

长垣油田调整井具有储层物性差异大、压力系数多、井网密、含水高等特点,固井质量难以保证,为此,大庆油田开展了地层压力预测、低温防窜、界面增强、预防套损等关键技术研究。采用动静态分析法预测钻前压力,压力系数预测误差在±0.08以内;采取自然电位法、流体测井的方法进行压力解释,压力系数解释误差在±0.05以内;在压力预测的基础上,应用了“高泄低补”的压力调整技术;针对高压地层,给出了发生水(气)窜的条件,提出了“压稳系数”及防水窜的临界条件;研制了低温防窜水泥浆,利用多相加速、分散增溶的原理,解决了低温下水泥浆过渡时间长引起的“胶凝失重”问题;采用核壳共聚乳胶粒代替普通共聚乳胶粒,使高聚物乳液在低温下形成聚合膜,解决了滤失后颗粒堆积引发的“桥堵失重”问题^[36];针对高渗地层,提出了界面胶结薄弱的键问题,建立了基准、载荷和环境等3种弱界面模型^[37-38];研制了滤饼增强剂,具有清洗、硬化、耦合、亲和作用,可降低滤饼厚度30%,提高滤饼强度60%,等效渗透率降低40%,第二界面胶结强度提高50%;研制了遇水膨胀封隔器,使密封能力大于10 MPa/m,有效预防了浅水层套损。通过以上技术攻关与实践,形成了满足大庆油田调整井固井要求的调整井固井技术,“十二五”期间,完成2 000余口调整井固井施工,固井质量不断提高,优质率提高8个百分点以上,管外冒油、气的比例降低4

百分点。

2 钻完井技术发展建议

“十三五”期间,大庆油田将全面进入“双特高”(特高含水、特高采出程度)开发期,面临的形势更加严峻,资源有序接替、产量规模保持都是世界级技术难题;加之 2014 年以来,国际油价持续低迷,油田勘探开发整体效益受到了严重影响,石油天然气行业迎来控投资、减产能和降成本的新形势。在该严峻形势下,为了保证国家油气战略资源和支持黑龙江经济稳增长,大庆油田制定了年产油气当量 $4\,000 \times 10^4$ t 持续稳产的战略目标。钻完井技术作为油气资源勘探开发的关键技术手段,对于该战略目标的实现起着举足轻重的作用。为此,大庆油田应进一步加大深部难钻地层、复杂区块调整井和非常规油气资源等 3 个资源领域的钻完井技术攻关,保证老区主力油田原油健康可持续开采,助力油气资源的有效接替,实现安全清洁高效生产。同时,应进一步开展随钻成像测井仪器、随钻声波测井仪器、随钻中子孔隙度测井仪器和自动化和智能化装备等前沿技术与装备研究,推动钻井技术向自动化、智能化和可视化方向发展。

2.1 加强深部难钻地层关键技术攻关

“十三五”期间,为实现年产油气当量 $4\,000 \times 10^4$ t 持续稳产的战略目标,需进一步加大深层天然气的勘探开发力度。然而,深部火山岩地层硬度高、研磨性强,目的层井段约占全井进尺的 30%,而施工周期却占 70%;复杂地层安全钻进问题尚未彻底解决,抗高温、防漏、堵漏、环保的钻井液还需要完善;固井水泥浆单一,不能完全满足复杂地质条件下固井需求。因此,应进一步强化深部难钻地层关键技术研究,解决钻完井技术难题,推进深层天然气高速高效开发。

2.1.1 抗高温随钻测量仪器的研制

近年来,自主研制的随钻测量仪器基本满足了大庆油田常规油气藏水平井钻井施工的需求。但是,随着大庆油田勘探开发深度的逐渐增大和深井数量的逐年增多,对随钻测量仪器的抗高温性能提出了更高的要求,现有抗 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 随钻测量仪器已不能完全满足钻井施工需要,在钻进深部高温地层时只能租赁抗高温随钻测量仪器,不但价格昂贵,而且

因供货周期难以控制而影响钻井周期。因此,需开展抗 $175\text{ }^\circ\text{C}$ 及更高温随钻测量仪器的研制,重点开展电子元器件和电路板抗高温、短节壳体密封性能及信号指令双向传输等关键技术攻关,满足深层高温水平井钻井施工需要,有效降低单井勘探开发成本,拓展深层天然气勘探开发深度和广度,为大庆油田以气补油提供有效的技术手段。

2.1.2 高效破岩技术研究

大庆油田深部地层因岩石坚硬、研磨性强,导致钻井作业存在机械钻速低、钻头寿命短等问题,因而需研究适用于火成岩目标层营城组地层的 PDC 复合片的破岩效率及损伤机理,研制适合深层钻井的高质量、高抗冲击和抗研磨的 PDC 复合片,进而研制出分别适用于火成岩深部难钻地层直井段和水平段的高效 PDC 钻头。同时,建议开展复合冲击钻井工具研究,利用周向振动和轴向冲击双重作用来改善深部地层破岩效果,提高机械钻速;探索双级双速钻井技术,通过双级双速切削岩石的方式(内外钻头旋转速度不同,内钻头高速先破坏岩石,外钻头低速再切削岩石),降低岩石围压效应,提高钻头破岩效率,从而提高机械钻速,为大庆油田深层钻井提速提效增加新的技术手段。

2.1.3 环保型抗高温钻井液性能优化

“十二五”末,大庆油田用水基钻井液替代了油基钻井液,取得了较好的现场应用效果;但是,水基钻井液在环保性能和抗高温方面仍需进一步优化。“十三五”期间,应进一步加大天然改性类处理剂、抗高温处理剂、环保型处理剂及纳米处理剂等自主研发力度,研制出满足不同井型钻井要求的环保型钻井液,从源头控制环境污染,满足新“两法”对安全环保的高标准要求,特别是在深井、超深井钻井方面,钻井液应首先满足环保和抗高温的性能要求。同时,应开展废弃钻井液处理技术,加强废弃钻井液的回收重复利用,以降低钻井成本、减少废弃物排放量;还要开展钻井液废弃物无害化处理技术研究,研制钻井液废弃物无害化处理装置,实现钻屑随钻无害化处理;应进一步完善钻井液废弃物固化处理技术,提高固化速度与固化物强度,实现废弃物的再利用,降低处理成本。通过以上技术攻关研究,最终形成从源头控制到末端治理的综合环保钻井液技术,以保障油田的健康可持续发展。

2.1.4 抗高温防窜固井技术研究

近年来,大庆油田研发出了抗高温水泥外加剂(抗温 200 ℃)、胶乳防窜水泥浆、防腐(防 CO₂)水泥浆、大温差低密度水泥浆和高效冲洗隔离液,并形成了深层防气窜固井技术。随着高温高压深层气井日益增多,地质环境日趋复杂,对深层高温防气窜固井技术提出了更高的要求。“十三五”期间,针对大庆油田地温梯度高的特点,需进一步研究抗 240 ℃高温水泥外加剂,提高水泥浆的抗温能力,以满足超深井高温固井安全施工需求;重点研究具有“温敏性”的水泥外加剂,做到高温调凝、低温助于强度发展,提高大温差井固井质量;探索自愈合、自修复和柔性等功能型水泥浆的研发,加强水泥环完整性研究,保持水泥环在油气井整个生命周期中具有良好的封隔能力。此外,应进一步研究开发环境友好型的水泥外加剂,实现绿色清洁生产。

2.2 强化复杂区块调整井钻完井配套技术研究

大庆油田老区已处于开发中后期,普遍存在多套异常压力体系,泥页岩地层易发生膨胀和蠕变,浅层易水浸、套损等,都对复杂区块调整井钻完井技术提出了挑战;井排多次加密对防斜打直及井眼防碰技术提出新要求;同时,老区下部扶扬油层还有很大的开发价值,但其埋藏深、物性差、丰度和产量低,采用新钻调整井的方式开发投入高,降低钻井成本难度很大,综合效益不明显。“十三五”期间,应加大外围区块调整井安全优快钻井技术研究,提高钻井速度,实现调整井钻完井作业安全高效;开展老井加深(侧钻)钻完井配套技术研究,以提高钻完井效率,降低钻完井成本;研制自动化钻机 and 井口智能化系列工具,提高钻井效率,降低工人劳动强度,提高钻井安全性;研究井控预警及安全处理技术,研制一套由传感器组作为核心部件的地下流体检测系统,避免井喷事故发生;开展高危井修井挤注作业固井技术研究,提高固井质量。通过以上技术攻关,提升复杂区块调整井固井质量,为精细挖潜提供钻完井技术支撑,为主力油田原油可持续开采提供钻完井技术保障。

2.3 加大非常规油气钻井技术研发

大庆油田非常规油气资源包括致密砂岩油、致密砂岩气、煤层气和页(泥)岩油等 4 大领域,占剩余油气资源的 50%以上,已经成为常规油气资源的重

要补充领域,其经济高效勘探开发对于大庆油田的持续发展具有重要意义。与国外非常规油气储层相比,大庆油田非常规油气藏地质条件非常复杂,钻完井技术面临诸多问题。“十二五”期间,大庆油田在致密油钻井技术方面进行了研究与试验,开展了致密油水平井工厂化作业模式探索,取得了较好效果,并开展了煤层气钻井技术前期研究与试验。“十三五”期间,大庆油田将围绕提高非常规油气资源钻井效率和固井质量、解决钻井过程中井漏和坍塌等井下故障的需求,深入开展旋转导向系统、随钻地震、新型提速工具、粒子冲击钻井和煤层气钻完井等技术和装备研究,保障非常规油气资源钻完井安全施工,实现大庆油田油气资源的有效接替。

3 结论与建议

1) 通过对复杂地层钻井技术、随钻测量与控制技术、深井提速提效关键技术、钻井液技术和固井技术进行攻关研究,形成了适合松辽盆地深层气藏、老区调整井和“三低”油气藏等系列集成配套钻完井技术,基本满足了大庆油田钻井提速、提效和降本的技术需求。

2) 随钻测井系统、液动旋冲工具、水力振荡器等提速提效关键工具实现了规模化生产和应用,钻井液技术基本满足了大庆油田安全环保高效施工,固井技术不仅满足了大庆油田不同地区和井型固井的需要,并且固井质量逐年提高。

3) 建议进一步加大深部难钻地层、复杂区块调整井和非常规油气资源等 3 个资源领域的钻完井技术攻关,保证老区主力油田健康可持续开采,助力油气资源的有效接替,实现安全清洁高效生产;同时,加强前沿高端技术攻关,打造钻井工程的有效利器,提升大庆油田钻井工程技术的核心竞争力。

参 考 文 献

References

- [1] 李瑞营,王峰,陈绍云,等. 大庆深层钻井提速技术[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(1): 38-43.
LI Ruiying, WANG Feng, CHEN Shaoyun, et al. ROP improvement in deep formations in the Daqing Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(1): 38-43.
- [2] 陈鑫,陈绍云,王楚,等. 扭力冲击器在宋深 9H 侧钻小井眼水平井中的应用[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(6): 32-35.
CHEN Xin, CHEN Shaoyun, WANG Chu, et al. Application of Tork Buster to sidetracking of slimhole horizontal well in Well

- Songshen 9H[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(6):32-35.
- [3] 李杉, 云海涛. 大庆海拉尔油田钻井提速难点与对策[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(5):59-62.
LI Shan, YUN Haitao. Difficulties and measures for improving ROP in Hailar Oilfield of Daqing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(5):59-62.
- [4] 陈绍云, 邢琛, 孙妍. 提高庆深气田气体钻井效率技术研究[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(1):22-25, 28.
CHEN Shaoyun, XING Chen, SUN Yan. Technical research on improving efficiency of gas drilling in Qingshen Gas Field[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(1):22-25, 28.
- [5] 韩福彬, 李瑞营, 李国华, 等. 庆深气田致密砂砾岩气藏小井眼水平井钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(5):56-61.
HAN Fubin, LI Ruiying, LI Guohua, et al. Horizontal slim-hole drilling technology for deep tight glutenite gas reservoir in Qingshen Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(5):56-61.
- [6] 刘文宇. 致密油水平固井技术探讨[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2014, 11(13):78-80.
LIU Wenyu. The cementing technology of tight oil horizontal well[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2014, 11(13):78-80.
- [7] 金成志, 杨东, 张永平, 等. 松辽盆地北部非均质致密油水平井增产改造设计优化技术[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(6):40-46.
JIN Chengzhi, YANG Dong, ZHANG Yongping, et al. Optimization techniques for stimulation design of horizontal wells of heterogeneous tight oil in northern Songliao Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(6):40-46.
- [8] 陈琳琳, 王永吉, 李瑞营. 垣平 1 井长水平段水平井设计与施工[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(6):115-119.
CHEN Linlin, WANG Yongji, LI Ruiying. Design and drilling of horizontal Well Yuanping 1 with long lateral section[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(6):115-119.
- [9] 陈绍云, 李瑗辉, 李瑞营, 等. 大庆油田葡浅 12 区块浅层稠油水平井钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(1):126-130.
CHEN Shaoyun, LI Aihui, LI Ruiying, et al. Horizontal well drilling technology in shallow heavy oil recovery in Block Puqian 12 of the Daqing Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(1):126-130.
- [10] 盛明仁, 王振光, 李军成. LWD 测量系统在桩 1-平 5 井中的应用[J]. 石油钻探技术, 2000, 28(3):32-34.
SHENG Mingren, WANG Zhenguang, LI Juncheng. Applications of LWD system in Zhuang 1 Ping 5 Well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2000, 28(3):32-34.
- [11] 杨春旭, 韩来聚, 步玉环, 等. 现代垂直钻井技术的新进展及发展方向[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(1):16-19.
YANG Chunxu, HAN Laiju, BU Yuhuan, et al. New development and future direction of modern vertical drilling technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(1):16-19.
- [12] 王义峰, 刘庆龙, 刘文庭, 等. 捷联式自动垂直钻井工具伺服控制设计及实现[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(3):95-101.
WANG Yifeng, LIU Qinglong, LIU Wenting, et al. Design and implementation of servo control of strap-down automatic vertical drilling system[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(3):95-101.
- [13] 赵志学, 韩玉安, 白晓捷, 等. 随钻井下仪整流和驱动模块检测装置的研制[J]. 石油仪器, 2008, 22(3):9-11.
ZHAO Zhixue, HAN Yu'an, BAI Xiaojie, et al. Development of detection equipment of the rectification and drive module for measurement while drilling downhole tools[J]. Petroleum Instruments, 2008, 22(3):9-11.
- [14] 赵志学, 韩玉安, 孟祥光, 等. 随钻测量井下压力、温度仪器的研制及应用[J]. 石油机械, 2010, 38(1):44-47.
ZHAO Zhixue, HAN Yu'an, MENG Xiangguang, et al. Development and application of the instrument for LWD measurement of downhole pressure and temperature[J]. China Petroleum Machinery, 2010, 38(1):44-47.
- [15] 刘修善, 侯绪田, 涂玉林, 等. 电磁随钻测量技术现状及发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(5):4-9.
LIU Xiushan, HOU Xutian, TU Yulin, et al. Developments of electromagnetic measurement while drilling [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(5):4-9.
- [16] 张进双, 赵小祥, 刘修善. ZTS 电磁波随钻测量系统及其现场试验[J]. 钻采工艺, 2005, 28(3):25-27.
ZHANG Jinshuang, ZHAO Xiaoxiang, LIU Xiushan. ZTS electromagnetic measurement while drilling system and its field experimentation[J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(3):25-27.
- [17] 马晓伟, 张显军, 赵德云, 等. 空气/氮气钻井技术在徐深 28 井的成功实践[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(3):19-23.
MA Xiaowei, ZHANG Xianjun, ZHAO Deyun, et al. Successful application of air/nitrogen drilling techniques in Xushen-28 Well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(3):19-23.
- [18] 杨决算. 大庆油田气体钻井配套技术及应用[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(6):47-50.
YANG Juesuan. Matching technology and application of gas drilling in Daqing Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(6):47-50.
- [19] 韩福彬, 张洪大, 姜玉芳, 等. 庆深气田深层 $\phi 111.1$ mm 井眼气体钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(4):61-65.
HAN Fubin, ZHANG Hongda, JIANG Yufang, et al. Qingshen $\phi 111.1$ mm deep hole gas drilling technique[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(4):61-65.
- [20] 王雷, 郭志勤, 张景柱, 等. 旋冲钻井技术在石油钻井中的应用[J]. 钻采工艺, 2005, 28(1):8-10.
WANG Lei, GUO Zhiqin, ZHANG Jingzhu, et al. Application of percussive-rotary drilling technology in oil wells[J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(1):8-10.
- [21] 蒋宏伟, 刘永胜, 翟应虎, 等. 旋冲钻井破岩力学模型的研究[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(4):13-16.
JIANG Hongwei, LIU Yongsheng, ZHAI Yinghu, et al. Re-

- search on rock-crushing mechanics model in rotary and percussive drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2006, 34(4):13-16.
- [22] 李博. 水力振荡器的研制与现场试验[J]. *石油钻探技术*, 2014, 42(1):111-113.
LI Bo. Development and pilot test of hydro-oscillator[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(1):111-113.
- [23] 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.
- [24] 成海, 郑卫建, 夏彬, 等. 国内外涡轮钻具钻井技术及其发展趋势[J]. *石油矿场机械*, 2008, 37(4):28-31.
CHENG Hai, ZHENG Weijian, XIA Bin, et al. The development trend of turbodrilling technology[J]. *Oil Field Equipment*, 2008, 37(4):28-31.
- [25] 冯定. 涡轮钻具防斜打快钻井理论与技术研究[J]. *石油钻探技术*, 2007, 35(3):9-11.
FENG Ding. Theoretical and technical study of deviation control and fast drilling in turbodrill[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2007, 35(3):9-11.
- [26] 屈沅治. 新型胺基抑制剂的合成(I): 分子结构设计与合成[J]. *钻井液与完井液*, 2010, 27(1):1-3, 7.
QU Yuanzhi. Study on a new amine shale inhibitor(I): the molecular design and synthesis[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2010, 27(1):1-3, 7.
- [27] 屈沅治. 泥页岩抑制剂 SIAT 的研制与评价[J]. *石油钻探技术*, 2009, 37(6):53-57.
QU Yuanzhi. Formulation and evaluation of a shale inhibitive agent SIAT[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2009, 37(6):53-57.
- [28] 侯杰, 刘永贵, 宋广顺, 等. 新型抗高温耐盐高效泥岩抑制剂合成与应用[J]. *钻井液与完井液*, 2016, 33(1):22-27.
HOU Jie, LIU Yonggui, SONG Guangshun, et al. Synthesis and application of a new high temperature high performance salt resistant shale inhibitor[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2016, 33(1):22-27.
- [29] 王昌军, 许明标, 苗海龙. 聚胺 UHIB 强抑制性钻井液的室内研究[J]. *石油天然气学报*, 2009, 31(1):80-83.
WANG Changjun, XU Mingbiao, MIAO Hailong. Experimental study on polyamine high inhibitive (UHIB) drilling fluid[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(1):80-83.
- [30] 侯杰, 刘永贵, 李海. 高性能水基钻井液在大庆油田致密油藏水平井中的应用[J]. *石油钻探技术*, 2015, 43(4):59-65.
HOU Jie, LIU Yonggui, LI Hai. Application of high-performance water-based drilling fluid for horizontal wells in tight reservoirs of Daqing Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(4):59-65.
- [31] 邹大鹏. 大庆油田致密油水平井强抑制防塌水基钻井液技术[J]. *石油钻采工艺*, 2015, 37(3):36-39.
ZOU Dapeng. High inhibition and anti-sloughing water-based drilling fluid technology for horizontal wells in tight oil reservoirs in Daqing Oilfield[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2015, 37(3):36-39.
- [32] 刘永贵, 宋涛, 徐用军. 高温深井微裂缝封堵评价方法及其应用: 以松辽盆地徐深气田为例[J]. *天然气工业*, 2016, 36(2):78-83.
LIU Yonggui, SONG Tao, XU Yongjun. A new evaluation method for micro-fracture plugging in high-temperature deep wells and its application: a case study of the Xushen Gas Field in the Songliao Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(2):78-83.
- [33] 张书瑞, 郭盛堂, 何文革, 等. 大庆油田深层气井固井技术[J]. *石油钻探技术*, 2007, 35(4):56-58.
ZHANG Shurui, GUO Shengtang, HE Wenge, et al. Cementing technologies for deep gas wells in Daqing Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2007, 35(4):56-58.
- [34] 李艳军, 张立功. 大庆油田深层气藏水平井钻井技术[J]. *石油钻探技术*, 2009, 37(5):47-51.
LI Yanjun, ZHANG Ligong. Deep horizontal well drilling technology used in Daqing Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2009, 37(5):47-51.
- [35] 杨勇. 新型抗高温水泥悬浮剂的研制与现场试验[J]. *石油钻探技术*, 2016, 44(3):44-49.
YANG Yong. Development and field application of a new high-temperature cement suspension agent[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, 44(3):44-49.
- [36] 侯力伟. 大庆油田低密度低温防窜水泥浆体系[J]. *钻井液与完井液*, 2016, 33(4):79-82.
HOU Liwei. Low density low temperature anti-channeling cement slurry used in Daqing Oilfield[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2016, 33(4):79-82.
- [37] 杨秀天, 王克诚, 张立, 等. 调整井固井弱界面问题探讨[J]. *钻井液与完井液*, 2010, 27(5):55-57.
YANG Xiutian, WANG Kecheng, ZHANG Li, et al. Discussion on weak interface of cement in adjustment well[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2010, 27(5):55-57.
- [38] 杨智光, 杨秀天, 张立, 等. 固井弱界面劣化机理及改善途径[J]. *钻井液与完井液*, 2010, 27(3):79-83.
YANG Zhiguang, YANG Xiutian, ZHANG Li, et al. Deterioration mechanism and improvement methods of weak interface in cementing[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2010, 27(3):79-83.

[编辑 陈会年]