

◀专家视点▶

doi:10.11911/syztjs.2022002

引用格式: 袁光杰, 付利, 王元, 等. 我国非常规油气经济有效开发钻井完井技术现状与发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(1): 1-12.

YUAN Guangjie, FU Li, WANG Yuan, et al. The up-to-date drilling and completion technologies for economic and effective development of unconventional oil & gas and suggestions for further improvements [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(1): 1-12.

我国非常规油气经济有效开发钻井完井技术 现状与发展建议

袁光杰^{1,2}, 付利^{1,2}, 王元^{1,2}, 郭凯杰^{1,2}, 陈刚^{1,2}

(1. 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 2. 油气钻井技术国家工程实验室, 北京 102206)

摘 要: 我国非常规油气资源储量丰富, 探索经济有效开发的钻井完井技术体系, 是加快其勘探开发进程与规模上产的关键。详细介绍了我国已形成的埋深 3 500 m 以浅非常规油气钻井完井技术体系, 包括三维丛式井水平井井眼轨道设计、地质工程一体化设计与作业、强化钻井参数提速、深层页岩气控温钻井、地质导向钻井、高性能钻井液和高效固井等关键技术, 指出目前仍存在工厂化作业模式未实现最优化、长水平段水平井钻井可重复性差、“一趟钻”技术与配套装备不成熟、抗高温高压材料及配套钻井工具欠缺等问题, 提出了加快推广大平台丛式水平井工厂化作业模式、持续优化长水平段水平井钻井技术、践行地质工程一体化理念和开展抗高温高压材料研发及配套工具研制等发展建议, 以大幅提升单井产量和采收率, 实现非常规油气的高效勘探开发。

关键词: 非常规油气; 页岩油气; 致密油气; 水平井; 水平钻井; 发展建议

中图分类号: TE24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2022)01-0001-12

The Up-to-Date Drilling and Completion Technologies for Economic and Effective Development of Unconventional Oil & Gas and Suggestions for Further Improvements

YUAN Guangjie^{1,2}, FU Li^{1,2}, WANG Yuan^{1,2}, GUO Kaijie^{1,2}, CHEN Gang^{1,2}

(1. CNPC Engineering Technology R & D Company Limited, Beijing, 102206, China; 2. National Engineering Laboratory of Petroleum Drilling Technology, Beijing, 102206, China)

Abstract: Abundant reserves of unconventional oil & gas resources occur in China. Exploring drilling and completion technology systems for the economic and efficient development is the key to speeding up the exploration and development process and scale up their production. This paper expounds the drilling and completion technology systems developed by Chinese researchers for unconventional oil & gas at less than 3 500 m depth. The key technologies in the systems involved wellbore trajectory design for three-dimensional cluster horizontal wells, design and operation of geology-engineering integration, rate of penetration (ROP) enhancement through drilling parameter optimization, managed temperature drilling of deep shale gas, geosteering, high-performance drilling fluid, and efficient cementing, etc. Nevertheless, it was noted that this systems still fell short in several ways. For example, optimal implementation of factory operation has yet to be achieved, the repeatability of horizontal well drilling with long horizontal sections was poor, the "one-trip drilling" technology and supporting equipment were not well established, and high-temperature and high-pressure (HTHP) resistant materials and supporting drilling tools were scant. Suggestions for further improvements were also put forward, such as accelerating the promotion of factory operation for large-platform cluster horizontal wells, continuously optimizing drilling technologies for horizontal wells with long horizontal sections, fulfilling the notion of geology-engineering integration, and conducting research &

收稿日期: 2021-11-29。

作者简介: 袁光杰 (1974—), 男, 河北邢台人, 1998 年毕业于西南石油学院机械设计专业, 2001 年获西南石油学院油气井工程专业硕士学位, 2004 年获上海交通大学机械制造及其自动化专业博士学位, 教授级高级工程师, 主要从事非常规油气钻井完井技术、地下储库建库工程技术等方面的研究工作。E-mail: ygjdri@cnpc.com.cn。

通信作者: 付利, E-mail: fulidri@cnpc.com.cn。

基金项目: 中国石油天然气集团公司项目“水平井优质高效钻完井技术研究”(编号: 2021DJ42)资助。

development (R & D) of HTHP resistant materials and developing supporting tools. These measures were expected to substantially boost the single well production and the recovery rate and thereby achieve efficient exploration and development of unconventional oil & gas.

Key words: unconventional oil & gas; shale oil & gas; tight oil & gas; horizontal well; horizontal well drilling; suggestions for further improvements

非常规油气是指在成藏机理、赋存状态、分布规律或勘探开发技术等方面有别于常规油气的烃类资源,可分为非常规石油资源和非常规天然气资源^[1-2]。非常规石油资源包括页岩油、致密砂岩油、油页岩、油砂和重油等;非常规天然气资源包括页岩气、致密砂岩气、煤层气、浅层生物气、水溶气和天然气水合物等^[1-2]。随着油气勘探开发不断深入,非常规油气在现有经济技术条件下展示出巨大的开发潜力,继油砂、致密气和煤层气等资源规模有效开发之后,近年来页岩油气、致密油气产量实现了高速增长^[3]。与常规油气资源相比,非常规油气资源储层条件差,多需要“水平井+体积压裂”才能实现有效开发。2014年,国际油价暴跌并持续低位运行,北美各大油气公司为摆脱低油价带来的经营困境,掀起了一场旨在“大幅度提高单井产量、努力降低建井成本”的页岩油气开发革命,使美国非常规油气产量占到油气总产量的60%~70%,一口垂深为2 000~3 000 m、水平段长2 000~3 000 m的水平井,钻井周期基本都能控制在15~25 d。我国在非常规油气资源勘探开发初期,通过借鉴和引进北美先进钻井完井理念、方法和技术,逐步实现了非常规油气资源的规模开发,水平井钻井完井技术也取了较大进步,但与北美相比仍存在钻井周期长、建井成本高和单井产量低等问题。因此,探索我国非常规油气经济有效开发的钻井完井关键技术并推广应用,是加快我国非常规油气资源勘探开发进程与规模上产的必由之路。

1 国外非常规油气开发现状

近年来,受页岩油气开发革命影响,国外非常规油气开发主要集中于致密油气与页岩油气,而煤层气开发呈现递减趋势。美国于1985年开始煤层气商业开发,2008年达峰值产量 $557 \times 10^8 \text{ m}^3$,2018年产量降至 $260 \times 10^8 \text{ m}^3$;加拿大于2002年开始煤层气商业开发,2010年达峰值产量 $94 \times 10^8 \text{ m}^3$,2018年产量为 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$;澳大利亚于2004年开始煤层气商业开发,产量逐年提高,2018年产量为 $410 \times 10^8 \text{ m}^3$,目前已成为全球最大的煤层气生产国^[4]。

美国是最早开发致密/页岩油气资源的国家,经历了页岩气革命(2007—2010年)和页岩油革命(2014—2019年)。美国非常规油气资源的开发主要集中在4个区带7个大型油气盆地:1)位于西部落基山脉山间及山前构造带的致密油气区,主要包括DJ-Niobrara、Unita和Great River等盆地;2)位于美加边界的Williston Bakken页岩油区;3)位于东部阿帕拉契盆地的Marcellus页岩气区;4)位于南部的页岩油气生产区,主要包括二叠盆地(Permian)页岩油、Barnett页岩气、Haynesville页岩气以及Eagle Ford页岩气^[5]。通过积极推广长水平段水平井和“一趟钻”钻井技术,钻井完井效率大幅提升,有效缩短了单井建井周期、降低了建井成本^[6-8]。2019年,美国页岩油气水平井水平段长度大于4 800 m的占比6%,水平段长度大于3 200 m的占比45%,水平段最长达5 638 m。Utica区块Purple Hayes 1H井完钻井深8 244.00 m,“一趟钻”进尺5 652.21 m,钻井周期仅为17.6 d。Eclipse公司通过应用“一趟钻”钻井技术,水平段单位长度的钻井成本降低了69%。截至2019年8月^[9-12],美国天然气平均日产量 $31.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中页岩气平均日产量达 $19.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,占比62%;美国原油日产量达 $174 \times 10^4 \text{ t}$,而页岩油/致密油日产量达 $106 \times 10^4 \text{ t}$,占比61%。2020年,美国页岩气产量 $7 330 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占其天然气总产量的80%;致密油/页岩油产量 $3.5 \times 10^8 \text{ t}$,占其原油总产量的50%。可以看出,美国油气能源结构已经完成从常规油气向非常规油气的转变。

2 国内非常规油气开发现状

初步评价结果表明,我国非常规油气可采资源量约为 $(890 \sim 1 260) \times 10^8 \text{ t}$ 油气当量,是常规油气的3倍左右^[13]。其中,非常规石油可采资源量约为 $(223 \sim 263) \times 10^8 \text{ t}$,与常规石油资源量大致相当;非常规天然气可采资源量约为 $(84 \sim 125) \times 10^{12} \text{ m}^3$,是常规天然气资源量的5倍左右。2020年,我国非常规油气产量接近 $7 000 \times 10^4 \text{ t}$ 油当量,成为“稳油增气”的重要资源。其中,非常规油是产量稳定的“砝码”,预计2030年将占原油总产量的20%;非

常规气是产量增长的“主力”，2030年在天然气总产量的占比有望超过50%^[14]。

中国石油天然气集团有限公司(简称中石油)非常规油气勘探开发已有十几年历史,历经概念提出与技术探索、工业化试验与试生产和规模发现与开发上产3个阶段,理论、技术、管理的进步推动了页岩油气和致密油气产量的快速增长,目前已进入工业化开发阶段^[4];建立了鄂东、沁水和筠连3个中高阶煤层气生产基地,2020年产气量 $22.0 \times 10^8 \text{ m}^3$;发现了鄂尔多斯盆地和四川盆地两大致密气区,2020年产气量 $337.9 \times 10^8 \text{ m}^3$;建成了四川长宁—威远和昭通国家级页岩气示范区,2020年产气量 $116.3 \times 10^8 \text{ m}^3$;初步建成了新疆吉木萨尔、长庆陇东、大庆古龙页岩油示范区。近几年,中石油通过借鉴引进北美先进油气工程技术并不断研究探索,非常规油气水平井钻井完井技术进步显著。长庆致密油气、大庆古龙页岩油水平井钻井基本已经达到“北美速度”,华H90-3页岩油水平井完钻井深7339 m,储层钻遇率88.0%,水平段长5060 m;靖51-29H1致密气水平井完钻井深8528 m,储层钻遇率97.6%,水平段长5256 m;华H100平台共完成页岩油水平井31口,创亚洲陆上水平井平台最大纪录;华H40平台共完成页岩油水平井20口,水平段平均长2014 m,钻井周期17.8 d;大庆古龙完钻井深5140 m,水平段长2500 m页岩油水平井的钻井周期已经缩短至20 d以内。川南页岩气长水平段水平井累计完成191口,水平段平均长度2179.6 m,其中7口井水平段长度超过3000 m,基本实现了1500 m水平段“一趟钻”完成,“一趟钻”最高进尺3700 m。吉木萨尔页岩油水平井钻井提速效果显著,平均完钻井深由4178 m增至5650 m,平均钻井周期由60.0 d降至47.5 d。

中国石油化工集团有限公司(简称中石化)非常规油气勘探开发主要集中于页岩油气资源,其中页岩气地质资源量达 $38.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[15]、页岩油地质资源量达 $150 \times 10^8 \text{ t}$ ^[16-17]。页岩气资源主要分布在四川盆地及周缘海相地层,自2006年启动页岩气早期资源潜力评价与战略选区以来,经历了学习借鉴、探索发现和规模上产3个阶段,建成了国内首个页岩气商业开发气田——涪陵页岩气田^[15],截至2020年底,涪陵页岩气田累计建产 $116 \times 10^8 \text{ m}^3$,年产量由2015年的 $31.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 上升到2020年的 $71.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2021年完钻的胜页9-2HF井和胜页9-6HF井完钻井深分别为6455和6780 m,水平段长度分别为3583和

3601 m,两次刷新国内页岩气水平井水平段最长纪录。自2010年开始页岩油资源勘探开发以来,经历了早期选区评价及专探井试验、新一轮基础研究与先导试验2个发展阶段,优选了东部探区南襄盆地泌阳凹陷、济阳凹陷及南方探区四川盆地等有利区,累计完钻17口页岩油水平井,平均完钻井深4338.26 m,平均垂深3227.06 m,最大垂深4308.67 m,水平段平均长度978.53 m,水平段最长1716.00 m。目前,济阳凹陷页岩油勘探取得重大突破,测试峰值产量达到171 t/d,并已初步形成陆相页岩油水平井工程技术体系^[18-19]。

中国海洋石油集团有限公司(简称中海油)于2010年并购中联煤层气有限责任公司(简称中联煤)50%股权,2014年完全收购,实现了在国内非常规油气上游领域的“登陆”^[20]。目前,中海油在国内拥有 $1.67 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的非常规气勘探矿权区,地质资源量达 $2.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中埋深小于1000 m的煤层气资源量近 $1.0 \times 10^{12} \text{ m}^3$,集中在沁水盆地;致密气资源量约 $0.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$,集中在鄂尔多斯盆地东缘。2012—2018年,中联煤累计完钻2500多口井,其中致密气井近500口,煤层气井约2000口,非常规气探明地质储量由2012年前的近 $1000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增至2018年底的约 $3600 \times 10^8 \text{ m}^3$,非常规气年产量从2012年的近 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增至2018年的约 $15 \times 10^8 \text{ m}^3$,年均增幅约 $(1 \sim 3) \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3 非常规油气钻井完井技术现状

通过十几年研究与实践,目前我国已基本形成了埋深3500 m以浅非常规油气钻井完井技术体系,包括三维丛式水平井井眼轨道设计、地质工程一体化设计与作业、强化钻井参数提速、深层页岩气控温钻井、地质导向、高性能钻井液和高效固井等关键技术。

3.1 三维丛式水平井井眼轨道设计

我国非常规油气藏资源丰富,但复杂的地表条件对井场布置、交通运输、水电供应等提出了很多挑战。为此,研究形成了丛式水平井钻井技术,即在同一平台布置多口水平井,以流水线方式实施钻井、完井、压裂等工程作业,以缩短作业时间、降低作业成本^[21]。井眼轨道设计对丛式水平井钻井完井施工有重大影响,要综合考虑井眼轨迹防碰、水平段长度、钻井完井施工难度及成本,进行平台及单井井眼轨道的最优化设计^[22]。

我国在开发非常规油气时,钻井平台一般布井4~6口,多采用交叉布井、勺形布井等模式^[23]。针对丛式水平井井眼轨迹偏移距大、靶前位移大、水平段长等特点,开展了井眼剖面、轨道参数优化设计。平台中心位置的水平井一般采用“直—增—稳”三段制井眼剖面的常规二维井眼轨道,而平台外侧水平井采用“直—增—稳—降—直”五段制井眼剖面的双二维井眼轨道(见图1),在技术套管井段进行造斜和扭方位,以有效降低大偏移长水平段水平井井眼轨迹控制难度^[24]。实际设计与施工时,需要对设计井眼轨道的摩阻扭矩进行计算,并合理选用钻头及螺杆钻具,优化增斜井段、进窗入靶井段的全角变化率,有效控制各井段全角变化率,以降低钻井作业的摩阻与扭矩^[25]。

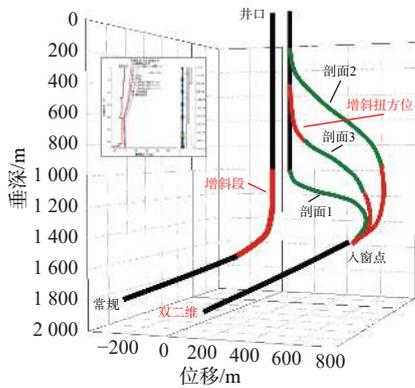


图1 常规二维与双二维井眼轨道设计示意

Fig.1 Conventional 2D and dual-2D wellbore trajectory design

3.2 地质工程一体化设计与作业模式

我国非常规油气藏复杂的地表和地下条件决定了要提升整体开发效益,必须采用地质工程一体化的设计与作业模式,即以提高勘探开发效益为中心,以地质—储层综合研究为基础,优化钻井完井设计,应用先进的钻井完井技术,采用全方位项目管理机制组织施工,最大限度地提高单井产量和降低工程成本,实现勘探开发效益最大化^[26-27]。其主要内容是地质—油藏—方案研究一体化,钻井和完井设计—施工工艺一体化,质量—安全—环保—评价全过程管理一体化,全方位提高储层品质、钻井品质和完井品质。

国内川渝页岩气,塔里木、新疆、长庆致密油气,以及吉林油田低渗透油藏开发中广泛应用了地质工程一体化设计与作业模式,形成了三维地质建模、地质力学建模、压裂模拟等多项关键技术。三维地质建模技术突破了地震分辨率较低、天然裂缝

发育非均质性强等难点,形成了井震结合精细构造建模、属性建模、多尺度裂缝建模等配套技术,模型整体精度高于85%^[28]。地质力学建模技术以单井地应力预测结果为约束,形成了建立平台、区块、全气田等不同尺度有限元模型的方法,在井壁垮塌预测、套变机理研究、井眼轨迹方位和水平段长度优化方面发挥了重要作用^[29]。压裂模拟技术实现了水力裂缝的精细刻画,以及支撑剂、裂缝导流能力、裂缝宽度、加砂浓度的定量描述,为压裂效果评估和优化设计提供了依据。

长宁国家级页岩气示范区在应用地质工程一体化设计与作业模式后,平均每口井日产量与评价期相比提高了127%,储层钻遇率提高了1.8倍,套管变形率下降了68%,水平段延长了53%,钻井周期缩短了53.3%^[30]。

3.3 强化钻井参数提速技术

北美页岩油气水平井普遍采用“高钻压、高转速、高泵压、大排量、大扭矩”的钻井参数,钻井速度普遍较高。与北美相比,我国非常规油气水平井的钻井参数偏低,区块平均机械钻速普遍较低。例如,长宁、威远、涪陵等页岩气田 $\phi 215.9$ mm井眼平均机械钻速普遍低于10 m/h,而北美同尺寸井眼平均机械钻速则高达25~80 m/h^[31]。为此,在配套设备改造及工具优选的基础上,大幅度提高了非常规油气水平井钻井参数,形成了强化钻井参数提速技术。其中,设备配套以现有设备升级改造为主,以满足强化钻井参数钻井对设备的要求。以长宁、威远、涪陵等页岩气田为例,ZJ50/70型钻机需配备压力等级52 MPa的循环系统、3台F1600HL型钻井泵、2台离心机(高速、中速各1台)和3台高频振动筛。工具配套的重点是选用大扭矩螺杆钻具和高效长寿命钻头,大扭矩螺杆钻具以引进为主,相对常规螺杆钻具,其具有承受钻压高、压差高、输出动力强、转速高等特点。例如, $\phi 244.5$ 和 $\phi 171.5$ mm大扭矩螺杆钻具的输出扭矩较常规螺杆钻具分别高约70%~130%和50%~73%。

目前,我国非常规油气水平井采用的强化钻井参数较常规钻井参数提高约20%~30%。以长宁、威远、涪陵等页岩气田为例, $\phi 311.1$ mm井眼钻进时采用的强化钻井参数为:钻压120~150 kN、转盘转速70~80 r/min、排量50~60 L/s; $\phi 215.9$ mm井眼钻进时采用的强化钻井参数为:钻压100~150 kN、转盘转速80~100 r/min、排量大于30 L/s。长宁页岩气田某平台 $\phi 215.9$ mm井眼采用强化钻井参数钻

进, 机械钻速达到 14.53~16.29 m/h, 较采用常规钻井参数的邻井平均提高 86%。

3.4 深层页岩气控温钻井技术

四川焦石坝、威荣、永川、泸州、渝西等页岩气区储层埋深大于 3 500 m^[32], 水平段钻进时井底平均循环温度超过 145 ℃, 最高 167 ℃, 超过了常用旋转导向钻井工具等井下测量工具的耐温极限(150 ℃), 导致井下测量工具频繁失效, 制约了 $\phi 215.9$ mm 井眼单趟钻进尺和“一趟钻”钻进目标的实现。为此, 开展了深层页岩气控温钻井技术研究。根据文献研究结果^[33], 降低钻井液密度能有效降低井底循环温度(见图 2)。现场试验表明, 钻井液密度降低 0.1 kg/L, 则井底循环温度降低约 2 ℃, 且钻井液密度越低, 循环温度降幅越大。为此, 基于 Bowers 卸载方程, 进行页岩储层异常高压机制判别, 结合上部井段正常压实作用下泥岩的声波速度和有效应力, 反演地区经验系数, 建立了深层页岩气区单井孔隙压力和三维孔隙压力模型, 以提高钻井液密度设计的准确性并降低设计值。同时, 应用欠平衡钻井技术, 井口施加 3~5 MPa 回压, 以进一步降低钻井液密度。为提高钻井液地面降温效率, 研制应用了钻井液地面降温装置, 采用“板式/空气换热器+喷淋(强制冷)”的组合降温模式, 钻井液降温处理能力满足大排量(大于 30 L/s)的要求, 地面入井钻井液温度能够降低 20 ℃ 以上。

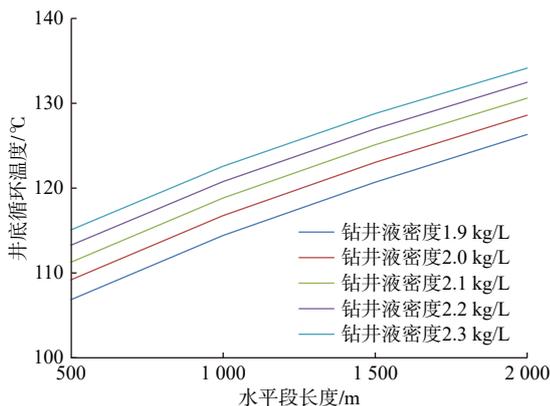


图 2 不同钻井液密度时的井底循环温度

Fig.2 Downhole circulating temperature at different drilling fluid density

2020—2021 年, 深层页岩气控温钻井技术在泸州页岩气区 10 口井进行了现场应用, $\phi 215.9$ mm 井眼平均井底循环温度控制在 145 ℃ 以下, 有效解决了高温造成井下测量工具失效的问题, 大大提高了钻井作业效率, 平均钻井周期缩短 28%~45%, 平均

机械钻速提高 39%~70%。为规范深层页岩气井控温钻井作业、提高钻进效率, 制订了《深层页岩气井水平段高温钻井规程》, 其包括钻井装备和工具要求、下钻工序要求和钻进工序要求等内容。

3.5 地质导向技术

水平井眼在优质储层中的延伸长度是决定水平井产能的关键因素, 我国非常规油气藏具有纵向靶窗小、优质储层埋藏深、构造复杂、地层倾角变化大等特点, 因此, 为提高储层钻遇率, 开展水平井精确地质导向技术研究尤为重要^[34]。近年来, 通过近钻头地质导向、旋转导向系统研制, 以及精细储层测井评价、三维地质建模、多参数实时轨迹预测等技术攻关, 探索形成了“随钻伽马测量+综合录井/元素录井+地质建模”地质导向技术^[35], 主要包括旋转地质导向、近钻头伽马地质导向和常规远端 LWD 地质导向等 3 项技术。现场施工时, 需要根据不同非常规油气藏的地质特点, 综合考虑钻井成本, 选择最优的地质导向技术, 以解决靶体厚度薄、微幅度构造及断层发育等问题。

旋转地质导向系统由地面监控系统、地面与井下双向传输通讯系统和井下旋转自动导向钻井系统组成, 能随钻完成井眼轨迹实时导向控制, 具有摩阻与扭矩小、井眼净化效果好、位移延伸能力强和井眼轨迹平滑易调控等优点, 能够满足高难度井和特殊油藏钻进时水平段精准着陆与井眼轨迹精确导向控制的需求。现场应用效果表明, 该系统的优质储层钻遇率高达 98.6%, 最优地质甜点钻遇率达到 91%, 但存在市场资源量较少、井壁掉块产生的卡钻风险高等问题, 且钻井成本高。相比常规远端 LWD 地质导向技术, 近钻头伽马地质导向系统的测量仪器距钻头更近, 钻进过程中可以及时测量钻头处的地质参数, 有效解决长水平段滑动钻进效率低、风险高的难题, 钻速相比常规定向提高 31%, 时效提高 25%, 可在一定程度上替代旋转地质导向系统。常规远端 LWD 地质导向技术是将 LWD 测量工具安装在距离钻头约 8~10 m 的位置, 可测量井斜角、方位角、电阻率、自然伽马、中子和声波等工程地质参数, 结合元素录井得到的岩石元素差异和不同元素的组合特征划分对比地层, 能综合判断钻头穿行位置, 具备资源多、成本低等优势, 可应用于分布连续稳定、较厚的储层, 能大幅降低钻井成本。

3.6 高性能钻井液技术

与常规水平井相比, 非常规油气水平井多为三维水平井, 水平段长且需要进行分段压裂。为降低

压裂难度,非常规油气水平井水平段方位多沿最小水平主应力方向,受储层裂缝发育影响,长水平段钻进时易发生垮塌、井漏和缩径等井下故障,且存在摩阻大、携岩困难等问题,要求钻井液必须具有良好的井壁稳定性、井眼清洁能力和润滑性。经过多年的研究与现场试验,国内已经形成较为成熟的以油基钻井液为主的页岩油气钻井液技术和以水基钻井液为主的致密油气钻井液技术。

3.6.1 油基钻井液体系

页岩地层层理发育、富含黏土矿物,采用水基钻井液钻进时易水化分散、膨胀,造成井壁失稳^[36],而油基钻井液几乎不与水敏性地层矿物发生作用,具有抑制性强、润滑性好、抗污染能力突出等特点,能有效控制页岩水化、分散和垮塌,从而确保井眼稳定^[37]。经过多年攻关研究与试验,国内页岩油气油基钻井液技术已由最初的国外引进,发展到目前全面实现了国产化且日益成熟。

针对涪陵地区非常规油气资源安全钻进需求,开发了“四低三高”油基钻井液体系^[38],其配方为柴油+1.2%~2.4%主乳化剂+0.8%~1.6%辅乳化剂+0.5~1.5%氧化钙+0.5~2.0%有机膨润土+0.5%~1.0%增黏剂+2.0~3.0%降滤失剂+0.1%~0.6%润湿剂+3.0%封堵剂。该钻井液具有低滤失、低黏度、低加量、低成本、高切力、高破乳电压和高稳定性的“四低三高”特点,与国外油基钻井液体系相比,在钻井效率、防漏堵漏和回收再利用等方面均具有显著优势,目前已全面替代了国外油基钻井液体系。例如,焦页54-3HF三开井段应用了“四低三高”油基钻井液体系^[39],钻进过程中钻井液主要性能保持稳定,破乳电压为500~900 V,塑性黏度和动切力分别为30~40 mPa·s和8~14 Pa,携岩返砂正常,起下钻通畅,套管下入顺利,且随钻封堵效果好,钻井液消耗量降至7.8 m³/100m,较该气田平均消耗量9.8 m³/100m大幅下降,基础油用量节约超过50 t,成本同比降低40%以上。

为满足永川、丁山等地区深部高应力页岩气地层的地质与工程需求,针对高温高密度油基钻井液沉降稳定性差的技术难题,通过自主攻关,研发了新型高温乳化剂和高密度流性调节剂,构建了高温高密度油基钻井液体系^[40-43],基础配方为75.0%~80.0%乳液+20.0%~25.0%CaCl₂溶液,其中乳液配方为柴油/矿物油+0.1%~0.5%SMASA+0.5%~1.5%有机膨润土+3.0%~6.0%主/辅乳化剂+3.0%~5.0%降滤失剂+2.0%~3.0%石灰。该钻井液主要

性能参数:密度1.75~2.10 kg/L,固相含量30%以下,漏斗黏度低于70 s,动切力大于10 Pa,抗温可达200 ℃。为降低油基钻井液的消耗量和使用成本,钻井过程中加入刚性SMSD-1、柔性SMRPA及纤维类SMFiber-O等封堵材料进行随钻堵漏,控制油基钻井液的消耗量低于8 m³/100m。同时,对于漏速大于5 m³/h的井漏,采用以亲油材料、遇油膨胀材料、纤维类材料等为主堵漏剂的广谱封堵技术和以亲油微膨胀固结材料为核心堵漏剂的油基固结封堵技术,实现快速封堵。

根据室内试验和现场应用,对川渝页岩气区油基钻井液体系的流变性、封堵性、固相含量和稳定性等进行了评价,并结合井下故障原因分析,认为:封堵性是保持井壁稳定的关键;提高钻井液 ϕ_6 值和排量可以改善井眼清洁状况;有害低密度固相含量增加是导致钻井液性能恶化的主要原因^[44]。针对井壁失稳、井眼清洁和性能维护等问题,制订了《川渝页岩气井油基钻井液技术规范》,实现了入井材料质量统一管理,确保施工安全和质量。

3.6.2 水基钻井液体系

针对油基钻井液体系存在的成本高、污染大和钻屑不易处理等问题,苏里格致密砂岩气藏长水平段水平井钻井采用了水基钻井液体系^[45],但面临降摩减阻、井眼清洁、泥岩井壁坍塌和储层保护等技术难题,要求水基钻井液必须具备强抑制防塌性能,以及良好的润滑性、携岩能力、流变性及其储层保护性能。通过室内试验,研制了强抑制润滑水基钻井液体系^[45-46],配方为1.5%~2.0%天然高分子降滤失剂+3.0%白沥青+12.0%~15.0%抑制剂HCOOK+10.0%复合盐抑制剂CQFY-1+3.0%聚合醇+0.2%烧碱+0.15%黄原胶+3.0%酸溶性储层保护剂+2.0%屏蔽暂堵剂+4.0%高效液体润滑剂。其中,HCOOK和CQFY-1可以提高钻井液密度,降低钻井液中固相含量和水的活度,增强钻井液抑制性,确保钻进泥岩井段时井眼稳定;聚合醇和高效液体润滑剂可在钻具、套管及井壁岩石表面上形成一层具有一定强度、可降低摩阻的润滑膜,从而达到降低钻具摩阻、扭矩的目的;酸溶性储层保护剂和屏蔽暂堵剂可有效增强钻井液的封堵性、改善滤饼质量、降低滤失量,达到强封堵防塌和储层保护的双重效果。

强抑制润滑水基钻井液在靖45-24H2井和靖50-26H1井进行了应用,密度1.27~1.35 kg/L,漏斗黏度55~68 s,API滤失量2.5~3.5 mL,高温高压滤

失量 8~12 mL, 含砂量 0.2%~0.3%, 塑性黏度 22~35 mPa·s, 动切力 10~14 Pa, 动塑比 0.45~0.60。2 口井水平段(长度分别为 3 321 和 4 418 m)钻进时, 钻井液携岩效果良好, 有效抑制了泥岩水化膨胀, 降低了摩阻扭矩, 保证了长水平段的安全高效钻进。2 口井采用相同的钻具组合通井, 钻具组合下至水平段 1 500 m 处时, 摩阻分别为 160 和 190 kN, 扭矩分别为 12 和 14 kN·m, 与同区块靖 72-58H2 井(水平段长 1 500 m, 应用其他钻井液体系)相比, 摩阻降低 32%~42%, 扭矩降低 22%~33%。

3.7 高效固井技术

非常规油气水平井完井采用体积压裂模式, 而体积压裂带来的大压差、大温差和交变载荷等复杂工况会造成套变、环空带压等问题, 从而严重影响井筒完整性, 这对固井质量提出了极高的要求。为此, 开展了套管下入技术、固井趾端压裂滑套、高效洗油冲洗隔离液、韧性水泥浆体系和泡沫水泥浆固井技术等攻关研究与现场试验, 形成了非常规油气水平井高效固井技术, 保障了井眼全生命周期的有效密封。

3.7.1 套管下入技术

对于长水平段水平井, 采用常规下套管方式极易因操作不当而造成下套管遇阻, 而常用的“上提下放”处理措施会对套管造成极大的轴向冲击载荷, 增加体积压裂过程中发生套管变形的风险^[47]。为此, 国内研究应用了旋转下套管和漂浮下套管技术^[47-49]。

旋转下套管技术通过采用顶驱下套管装置实现套管夹持、精准上扣和循环钻井液, 在下套管过程中可旋转套管串, 有助于套管顺利下入。顶驱下套管装置是旋转下套管技术的核心装备, 前期以引进国外产品为主, 目前国内已实现了自主研发, 主要技术参数如表 1 所示。旋转下套管技术主要在川渝页岩气区进行了推广应用^[47], 已累计应用 330 余口井, 摩阻系数比常规下套管井平均降低 30%~50%。

表 1 国产顶驱下套管装置主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of China-made top-drive casing-running device

型号	适用套管外径/ mm	水眼密封压力/ MPa	最大工作扭矩/ (kN·m)
XTG140H外卡	114~140	35~70	35
XTG140H内卡	168~244	35~70	35
XTG168内卡	244~340	50	50
XTG340内卡	340~508	15~35	50

漂浮下套管技术的核心装备是漂浮接箍, 它安装在套管柱的某部位, 利用其临时屏障作用, 上部套管中充满钻井液, 下部套管中为空气, 使下部套管“漂浮”于井眼中, 减少了下部套管与井壁之间的正压力, 降低管串在斜井段、水平段的下行摩阻, 有助于套管安全下入。固井作业时, 通过井口增压, 打开漂浮接箍, 使漂浮接箍上下的套管柱形成通路, 从而进行正常的注水泥作业。漂浮下套管技术主要在浅层页岩气区、苏里格致密气区和陇东页岩油区等进行了推广应用^[45-46,50]。在昭通浅层页岩气区, 较常规下套管技术, 漂浮下套管技术能平均节约时间约 21.95 h, 作业时效提高了 30%~40%。长庆陇东页岩油区华 H50-7 井应用漂浮下套管技术, 实现了 4 088 m 水平段套管的安全下入, 用时仅 26.5 h, 套管下至井底时大钩载荷为 350 kN, 而如果采用常规下套管技术, 套管下至井底时大钩载荷仅为 150 kN(按裸眼段摩阻系数为 0.21 计算)。

3.7.2 固井趾端压裂滑套

在水平井桥塞分段分簇体积压裂施工前, 通常采用连续油管传输射孔或爬行器带动射孔枪送入井底射孔的方式建立第一段压裂液流通通道, 然后采用泵送方式带动测井仪器、桥塞、射孔枪等进行测井、封堵、射孔及后续的压裂作业。建立第一段压裂液流通通道时, 存在射孔枪难以下至井底、施工风险大、作业时间长和费用高等问题, 为此, 研制了 DRCFT 固井压裂趾端滑套^[51], 可在不改变现有固井工艺的前提下, 水泥浆凝固后无须通过射孔或其他工具作业, 仅在井口憋压便可将趾端滑套打开, 建立水平井第一段压裂液流通通道, 直接进行压裂作业或将辅助测井仪器等其他工具下至井底。

固井作业时, 将固井趾端压裂滑套作为套管串的一部分下至预定位置, 正常进行固井施工。压裂前应用压裂车对井筒内套管进行阶梯式试压, 当试压压力达到滑套开启阀的开启压力时, 开启阀打开, 套管内液体及液体压力通过传压孔传递, 作用于滑套本体外侧截面, 使滑套本体产生向下滑动的压差, 滑套向下移动, 露出压裂液流动槽, 建立套管内外连通通道, 然后可直接进行压裂作业或泵送测井仪器、桥塞、射孔枪等后续作业工具。DRCFT 固井趾端滑套在昭通页岩气区 31 口井进行了现场应用, 从固井作业到压裂井筒试压, 最长放置时间 509 d, 压裂时滑套均能顺利打开且满足压裂施工要求, 开启成功率为 100%, 且未发生滑套提前打开的问题。

3.7.3 高效洗油冲洗隔离液与韧性水泥浆体系

为解决油基钻井液条件下固井界面清洗与隔离的难题^[52],通过复配不同性质的表面活性剂,研制了洗油冲洗剂CXJ-0,充分利用表面活性剂对油的“卷缩、乳化、增溶”等作用,发挥“协同增效”的作用,提高清洗界面油污、油膜的能力。以洗油冲洗剂CXJ-0为核心处理剂,配制了高效洗油冲洗隔离液体系,基本配方为悬浮稳定剂XFJ-5+冲洗剂CXJ-0+加重剂+水。室内性能评价试验结果表明,该隔离液密度在1.50~2.40 kg/L范围内可调,在90℃下养护20 min后静置2 h,上下密度差小于0.02 kg/L,常温下的流动度大于22 cm,满足安全泵送要求,常温和高温(120℃)条件下的冲洗效率达90.1%~96.9%。

大规模体积压裂施工时高泵压、大排量注替产生的剧烈压力变化和冲击,容易导致水泥环产生微裂隙甚至破裂,破坏井筒的密封性,从而发生环空气窜,严重影响开发安全^[53-54]。为确保长水平段的良好封固质量和井筒密封的完整性,研发了以防窜剂FCJ-7、加筋增韧剂ZRJ-6和聚合物降滤失剂JSSJ-13为核心处理剂的韧性防窜水泥浆体系^[52]。该水泥浆体系在凝固时产生轻度体积膨胀,可以封堵环空微隙,提高水泥环与套管、地层界面的胶结质量。室内试验结果表面,该水泥浆体系凝固后的水泥石具有低弹性模量、高强度的特点,韧性和抗冲击性能良好,与常规水泥石相比,在保持抗压强度33.89 MPa的前提下,抗拉强度增至3.30 MPa,弹性模量降至5.75 GPa,韧性显著增强。

高效洗油冲洗隔离液与韧性防窜水泥浆体系在长宁—威远和昭通国家级页岩气开发示范区500余口井进行了推广应用,平均完钻井深4 832 m,最深完钻井深5 880 m,最大垂深3 603 m,平均水平段长1 560 m,最长水平段2 000 m,固井质量得到大幅度提升,优质率89.58%、合格率97.32%,井筒完整性得到改进,满足了大型分段压裂的需求。

3.7.4 泡沫水泥浆固井技术

针对渝东常压页岩气水平井水平段低压易漏及分段压裂后环空带压的难题,开展了机械充氮泡沫水泥浆固井技术攻关研究^[55]。针对不同的封固井段和地层温度分布情况,通过优选发泡剂和稳泡剂等关键水泥添加剂,开发了泡沫水泥浆领浆和尾浆基浆(分别为1#和2#),其中1#水泥浆配方为700.0 g G级水泥+14.0 g蛋白质发泡剂+4.2 g高温稳泡剂+21.0 g抗高温降滤失剂+1.4 g缓凝剂+340.0 g现

场水,主要用于直井段泡沫固井,可达到防漏的目的;2#水泥浆配方为800.0 g G级水泥+16.0 g高分子发泡剂+4.8 g高温稳泡剂+32.0 g弹性材料+24.0 g耐高温降滤失剂+8.0 g硅质防气窜剂+2.4 g分散剂+1.6 g缓凝剂+340.0 g现场水,主要用于斜井段和水平段泡沫固井,可达到防漏和提高水泥环密封能力的目的。泡沫水泥浆密度为1.30~1.55 kg/L,泡沫半衰周期33.8 h,泡沫水泥石弹性模量4.6 GPa,循环载荷测试条件下水泥石残余应变0.21%,具备良好的力学性能。

2018年以来,机械充氮泡沫固井技术在渝东地区20口易漏窄密度窗口常规页岩气水平井进行了应用,固井质量优质率100%,且压裂后均无环空带压现象,较2018年采用常规水泥浆固井的16口同类井,固井质量优质率提高31%,环空带压井比例由48%降低至0。

4 发展建议

目前,我国非常规油气勘探开发尚处于发展初期,虽然已初步形成了非常规油气水平井钻井完井技术体系,但仍存在工厂化作业模式未实现最优化、长水平段水平井钻井可重复性差、“一趟钻”技术与配套装备不成熟、抗高温高压材料及配套钻井工具欠缺等不足,因此,需深入推进页岩革命,开展一系列的非常规油气水平井钻井完井关键技术研究、探索和完善,大幅提升单井产量和采收率,实现非常规油气的高效勘探开发。

4.1 加快推广大平台丛式水平井工厂化作业模式

目前,川渝页岩气水平井钻井平台多为4口井平台,占比约为30.22%,其次为6口井和8口井平台,分别占比约24.63%和11.94%。长庆致密油气水平井钻井平台以5~6口井平台为主,部分平台实现了大平台布井,例如华H100钻井平台布井31口、华H40钻井平台布井20口、华H60钻井平台布井22口,而北美页岩油气水平井钻井平台布井总数少者为16~20口、多者为40~64口。因此,应进一步增加钻井平台布井总数,拓展大平台丛式井组对储层的开发控制面积,以挖掘“工厂化”作业模式的降本增效潜力,实现作业效率大幅提高、单井成本显著降低。

川渝页岩气有利区块多位于丘陵和中低山地区,平地不多,因此提高单平台布井数量(8~10口以上)对缩短钻井周期、降低建井成本、推进页岩气

效益建产具有重要作用。长庆致密油气藏采用多层次立体开发模式(见图 3), 因此增大单平台 20 口井以上平台的数量, 将极大推动地下油气“工厂化”开发。为此, 需要在优化井位部署、钻机快速移动系统研制、密集丛式井组防碰打快与井眼轨迹控制和立体井网压裂技术研究等方面开展技术攻关。

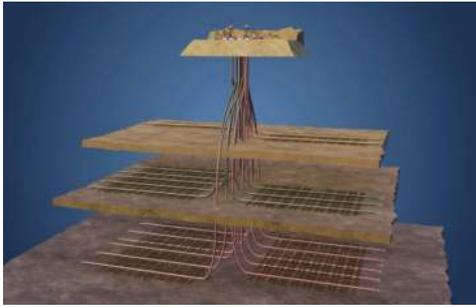


图 3 长庆致密油气多层次立体开发模式

Fig.3 Multi-layer stereoscopic development mode for Changqing tight oil & gas

4.2 持续优化长水平段水平井钻井技术

与北美相比, 国内非常规油气长水平段水平井数量较少, 且水平段长度差距明显。例如, 中石油非常规油气水平井水平段平均长度为 1 026 m, 其中致密油气水平井水平段最长为 5 256 m, 页岩油气水平井水平段最长为 3 150 m, 而北美页岩油气水平井水平段长度大于 4 800 m 的占 6%, 水平井水平段长度大于 3 200 m 的占 45%。

生产实践表明, 长水平段水平井产量优势明显。以川南页岩气为例, 已累计完成 100 口长水平段水平井的测试, 平均测试产量 $27.23 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 较常规水平井测试产量提高 31.5% (水平段长度较常规水平井约增加 25.0%)。因此, 积极开展长水平段水平井钻井关键技术攻关^[16], 对于缩小与国外非常规油气水平井钻井技术差距, 提高单井产量和可采储量, 实现非常规油气效益开发具有重要意义。结合目前技术现状, 需开展长水平段水平井钻井风险预警和钻井参数实时优化, 研制降摩减阻、随钻防卡、井眼清洁和井下数据采集等工具, 同时配套强封堵防塌油基钻井液、长水平段套管安全下入和固井工艺等, 最终形成成熟的 3 000 m 长水平段水平井钻井技术体系, 并在 3 000~4 000 m 长水平段水平井钻井技术体系上有所突破。

4.3 践行地质工程一体化开发理念

研究及实践表明, 地质工程一体化是实现非常规油气效益开发的关键。因此, 践行地质工程一体化开发理念, 快速推进地质工程一体化实践, 对于

增储上产意义重大, 需要开展一系列技术攻关^[56]:

1) 建立健全地质工程一体化运行机制, 各专业、各部门人员形成一体化协同研究团队, 由集成管理办公室统一管理, 利用一体化平台开展一体化设计, 进行一体化施工; 2) 形成地质工程一体化“数据湖”, 把不同结构、类型、来源的数据统一存储, 使不同数据有一致的管理和调用方式, 解决数据孤岛和数据集成共享的问题; 3) 加强地质力学基础研究与应用, 强化多尺度地质力学模型在钻井、完井、压裂模拟中的应用, 充分发挥地质力学在井位部署、井眼轨道优化、钻井完井风险评估、压裂优化设计和压后评估中的作用。

4.4 开展抗高温高压材料研发及配套钻井工具研制

实现深层页岩气资源的有效动用是实现页岩气中长期发展规划的重要基础, 例如, 中石油川南深层页岩气埋深 4 500 m 以浅的资源量 $9.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 其中埋深 3 500 m 以深的资源量占 86%。川南深层页岩气水平井钻井井底循环温度超过 145 °C, 旋转导向工具高温失效率达 64%, 需开展电子元件抗高温材料升级、密封材料与密封结构优化和随钻非电驱动主动降温技术研究, 以提高旋转导向工具抗温能力 (耐温达到 175 °C 以上), 从而减少起下钻次数, 提高钻井综合时效。同时, 需要开展钻井液降温技术及恒流变高比热容相变控温钻井液技术攻关, 利用相变材料可逆相态变化, 实现热量储存、转化和利用, 调节环境温度, 形成理想的井底钻井液温度窗口, 保证井下仪器与工具的工作稳定性。

4.5 加大“一趟钻”国产配套技术和产品的升级、研发与推广

目前, “一趟钻”技术现已成为非常规油气水平井钻井降本增效的重要途径, 国内已在若干非常规油气水平井中实现了关键井段“一趟钻”, 但技术成熟度与国外相比仍存在较大差距, 仍需进行“一趟钻”配套技术国产化, 加强国产旋转导向、地质导向等系统的升级完善, 提高工具可靠性和应用率, 以进一步降低钻井成本。其中, 国外旋转导向钻井系统已十分成熟, 并研发了近钻头旋转导向系统, 国内虽已研制成功 CG Steer 等旋转导向系统, 但整体性能低于国外同类产品, 需进一步在推广应用中不断升级完善。国外近钻头地质导向工具的成熟产品众多, 适用于水基和油基钻井液环境, 但国内 CGDS 近钻头地质系统同类产品仅适用于水基钻井液环境, 需开展高电阻循环介质电磁波传输机理研究, 实现油基钻井液条件下的高效无线短

传。等壁厚大扭矩螺杆要突破传统橡胶定子的局限,以等壁厚定子为出发点提升螺杆输出扭矩,并配合个性化PDC钻头实现难钻地层的钻井提速。

5 结 论

1) 国外非常规油气资源已成为油气产量的支柱,通过技术引进和自主研究,国内非常规油气资源开发虽已进入工业化实施阶段,但仍面临众多关键技术难题,在钻井周期、建井成本、单井产量等方面仍具有较大提升空间。

2) 通过攻关研究与现场应用,国内初步形成了非常规油气水平井钻井完井关键技术规范和推荐做法,可有效提高非常规油气钻井完井效率与质量,建议进一步加快推广应用,并不断完善优化,以满足非常规油气经济高效开发需求。

3) 为实现非常规油气高效开发,建议加快推广大平台丛式井的工厂化作业模式,践行地质工程一体化理念,优化长水平段水平井钻井技术,攻克旋转导向工具完全国产化、抗高温高压材料研制等技术难题,为非常规油气资源规模效益开发提供有力保障。

参 考 文 献

References

- [1] 马永生,冯建辉,牟泽辉,等.中国石化非常规油气资源潜力及勘探进展[J].*中国工程科学*,2012,14(6):22-30.
MA Yongsheng, FENG Jianhui, MU Zehui, et al. The potential and exploring progress of unconventional hydrocarbon resources in Sinopec[J]. *Strategic Study of CAE*, 2012, 14(6): 22-30.
- [2] 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.
- [3] 邹才能,杨智,何东博,等.常规-非常规天然气理论、技术及前景[J].*石油勘探与开发*,2018,45(4):575-587.
ZOU Caineng, YANG Zhi, HE Dongbo, et al. Theory, technology and prospects of conventional and unconventional natural gas[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(4): 575-587.
- [4] 李国欣,朱如凯.中国石化非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J].*中国石油勘探*,2020,25(2):1-13.
LI Guoxin, ZHU Rukai. Progress, challenges and key issues of unconventional oil and gas development of CNPC[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(2): 1-13.
- [5] 张宁宇,王青,王建君,等.近20年世界油气新发现特征与勘探趋势展望[J].*中国石油勘探*,2018,23(1):44-53.
ZHANG Ningning, WANG Qing, WANG Jianjun, et al. Characteristics of oil and gas discoveries in recent 20 years and future exploration in the world[J]. *China Petroleum Exploration*, 2018, 23(1): 44-53.
- [6] 杨金华,郭晓霞.一趟钻新技术应用与进展[J].*石油科技论坛*,2017,36(2):38-40.
YANG Jinhua, GUO Xiaoxia. Application of new technology: single bit-run drilling[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2017, 36(2): 38-40.
- [7] 光新军,叶海超,蒋海军.北美页岩油气长水平段水平井钻井实践与启示[J].*石油钻采工艺*,2021,43(1):1-6.
GUANG Xinjun, YE Haichao, JIANG Haijun. Drilling practice of shale oil & gas horizontal wells with long horizontal section in the North America and its enlightenment[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(1): 1-6.
- [8] 田洪亮,吕建中,李万平,等.低价油下北美地区降低钻井完井作业成本的主要做法及启示[J].*国际石油经济*,2016,24(9):36-43.
TIAN Hongliang, LYU Jianzhong, LI Wanping, et al. Main practice of reducing drilling and completion cost in North America under low oil price and its enlightenment[J]. *International Petroleum Economics*, 2016, 24(9): 36-43.
- [9] US Energy Information Administration (EIA). Shale gas production [EB/OL]. [2019-12-31]. <https://www.eia.gov/petroleum/data.php>.
- [10] US Energy Information Administration (EIA). Nature gas production [EB/OL]. [2019-12-31]. <https://www.eia.gov/petroleum/data.php>.
- [11] US Energy Information Administration (EIA). Monthly crude oil production [EB/OL]. [2021-06-01]. <https://www.eia.gov/petroleum/data.php>.
- [12] US Energy Information Administration (EIA). Tight oil production estimates by play [EB/OL]. [2021-06-01]. <https://www.eia.gov/petroleum/data.php>.
- [13] 邹才能,杨智,朱如凯,等.中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J].*地质学报*,2015,89(6):979-1007.
ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHU Rukai, et al. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(6): 979-1007.
- [14] 邹才能,潘松圻.“三个创新”推动非常规油气“三个突破”[N].*中国科学报*,2021-01-06(3).
ZOU Caineng, PAN Songqi. With the innovation of theory, institution and management to promote the three breakthrough in unconventional oil & gas[J]. *China Science Daily*, 2021-01-06(3).
- [15] 蔡勋育,刘金连,张宇,等.中国石化“十三五”油气勘探进展与“十四五”前景展望[J].*中国石油勘探*,2021,26(1):31-42.
CAI Xunyu, LIU Jinlian, ZHANG Yu, et al. Oil and gas exploration progress of Sinopec during the 13th Five-Year Plan period and prospect forecast for the 14th Five-Year Plan[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(1): 31-42.
- [16] 张锦宏.中国石化页岩油工程技术现状与发展展望[J].*石油钻探技术*,2021,49(4):8-13.
ZHANG Jinhong. Present status and development prospects of Sinopec shale oil engineering technologies[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(4): 8-13.
- [17] 王敬,魏志鹏,胡俊瑜.中国页岩油气开发历程与理论技术进展[J].*石油化工应用*,2021,40(10):1-4.
WANG Jing, WEI Zhipeng, HU Junyu. Development history and theoretical technology progress of shale oil and gas in China[J]. *Pet-*

- rochemical Industry Application, 2021, 40(10): 1–4.
- [18] 孙焕泉, 蔡勋育, 周德华, 等. 中国石化页岩油勘探实践与展望 [J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 569–575.
SUN Huanquan, CAI Xunyu, ZHOU Dehua, et al. Practice and prospect of Sinopec shale oil exploration[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 569–575.
- [19] 李宗田, 肖勇, 李宁, 等. 低油价下的页岩油气开发工程技术新进展 [J]. 断块油气田, 2021, 28(5): 577–585.
LI Zongtian, XIAO Yong, LI Ning, et al. New progress in shale oil and gas development engineering technology under low oil prices[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(5): 577–585.
- [20] 谢玉洪, 蔡东升, 孙晗森. 中国海油非常规气勘探开发一体化探索与成效 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 27–32.
XIE Yuhong, CAI Dongsheng, SUN Hansen. Exploration and effect of exploration and development integration in unconventional gas of CNOOC[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 27–32.
- [21] 高德利. 大型丛式水平井工程与山区页岩气高效开发模式 [J]. 天然气工业, 2018, 38(8): 1–7.
GAO Deli. A high-efficiency development mode of shale gas reservoirs in mountainous areas based on large cluster horizontal well engineering[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(8): 1–7.
- [22] 林家昱. 丛式水平井并眼轨道优化设计 [D]. 西安: 西安石油大学, 2015.
LIN Jiayu. Optimization design in cluster horizontal wells trajectory[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2015.
- [23] 孟璧桥, 周柏年, 付志, 等. 勺形水平井在四川长宁页岩气开发中的应用 [J]. 特种油气藏, 2017, 24(5): 165–169.
MENG Beiqiao, ZHOU Bainian, FU Zhi, et al. Application of spoon-shaped horizontal wells for development of shale gas in Changning, Sichuan[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(5): 165–169.
- [24] 刘伟, 何龙, 胡大梁, 等. 川南海相深层页岩气钻井关键技术 [J]. 石油勘探技术, 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.
- [25] 王万庆, 石仲元, 付任骞. G0-7 三维水平井井组工厂化钻井工艺 [J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(2): 27–31.
WANG Wanqing, SHI Zhongyuan, FU Qianqian. Factory drilling technology for G0-7 3D horizontal well group[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(2): 27–31.
- [26] 胡文瑞. 地质工程一体化是实现复杂油气藏效益勘探开发的必由之路 [J]. 中国石油勘探, 2017, 22(1): 1–5.
HU Wenrui. Geology-engineering integration: a necessary way to realize profitable exploration and development of complex reservoirs[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 1–5.
- [27] 章敬. 非常规油藏地质工程一体化效益开发实践: 以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油为例 [J]. 断块油气田, 2021, 28(2): 151–155.
ZHANG Jing. Effective development practices of geology-engineering integration on unconventional oil reservoirs: taking Lucaogou Formation shale oil in Jimsar Sag, Junggar Basin for example[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(2): 151–155.
- [28] 黄浩勇, 范宇, 曾波, 等. 长宁区块页岩气水平井组地质工程一体化 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(1): 175–182.
HUANG Haoyong, FAN Yu, ZENG Bo, et al. Geology-engineering integration of platform well in Changning Block[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(1): 175–182.
- [29] 杨恒林, 乔磊, 田中兰. 页岩气储层工程地质力学一体化技术进展与探讨 [J]. 石油钻探技术, 2017, 45(2): 25–31.
YANG Henglin, QIAO Lei, TIAN Zhonglan. Advances in shale gas reservoir engineering and geomechanics integration technology and relevant discussions[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(2): 25–31.
- [30] 谢军, 鲜成钢, 吴建发, 等. 长宁国家级页岩气示范区地质工程一体化最优关键要素实践与认识 [J]. 中国石油勘探, 2019, 24(2): 174–185.
XIE Jun, XIAN Chenggang, WU Jianfa, et al. Optimal key elements of geoenvironment integration in Changning National Shale Gas Demonstration Zone[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 174–185.
- [31] 王彦祺, 贺庆, 龙志平. 渝东南地区页岩气钻井技术主要进展及发展方向 [J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(3): 356–364.
WANG Yanqi, HE Qing, LONG Zhiping. Main progress and development direction of shale gas drilling and completion technologies in Southeastern Chongqing[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 356–364.
- [32] 何治亮, 聂海宽, 蒋廷学. 四川盆地深层页岩气规模有效开发面临的挑战与对策 [J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(2): 1–11.
HE Zhiliang, NIE Haikuan, JIANG Tingxue. Challenges and countermeasures of effective development with large scale of deep shale gas in Sichuan Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(2): 1–11.
- [33] TRICHEL K, FABIAN J. Understanding and managing bottom hole circulating temperature behavior in horizontal HT wells: a case study based on Haynesville horizontal wells[R]. SPE-140332-MS, 2011.
- [34] 林昕, 苑仁国, 秦磊, 等. 地质导向钻井前探技术现状及进展 [J]. 特种油气藏, 2021, 28(2): 1–10.
LIN Xin, YUAN Renguo, QIN Lei, et al. Present situation and progress of geosteering drilling pre-prospecting technology[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(2): 1–10.
- [35] 伍贤柱. 四川盆地威远页岩气藏高效开发关键技术 [J]. 石油勘探技术, 2019, 47(4): 1–9.
WU Xianzhu. Key technologies in the efficient development of the Weiyuan shale gas reservoir, Sichuan Basin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(4): 1–9.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 潘军, 刘卫东, 张金成. 涪陵页岩气田钻井工程技术进展与发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(4): 9–15.
PAN Jun, LIU Weidong, ZHANG Jincheng. Drilling technology progress and recommendations for the Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(4): 9–15.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 臧艳彬. 川东南地区深层页岩气钻井关键技术[J]. *石油钻探技术*, 2018, 46(3): 7–12.
ZANG Yanbin. Key drilling technology for deep shale gas reservoirs in the Southeastern Sichuan Region[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(3): 7–12.
- [44] 王建华, 张家旗, 谢盛, 等. 页岩气油基钻井液体系性能评估及对策[J]. *钻井液与完井液*, 2019, 36(5): 555–559.
WANG Jianhua, ZHANG Jiaqi, XIE Sheng, et al. Evaluation and improvement of the performance of oil base drilling fluids for shale gas drilling[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2019, 36(5): 555–559.
- [45] 胡祖彪, 张建卿, 王清臣, 等. 长庆致密气超长水平段水基钻井液技术[J]. *钻井液与完井液*, 2021, 38(2): 183–188.
HU Zubiao, ZHANG Jianqing, WANG Qingchen, et al. Water base drilling fluid technology for ultra-long horizontal drilling in a tight gas well in Changqing Oilfield[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2021, 38(2): 183–188.
- [46] 蒙华军, 张矿生, 谢文敏, 等. 长庆致密气藏4 000 m水平段钻井技术实践与认识[J]. *钻采工艺*, 2021, 44(4): 119–122.
MENG Huajun, ZHANG Kuangsheng, XIE Wenmin, et al. Practice and recognition of drilling technology in 4 000 m horizontal section of tight gas reservoir in Changqing[J]. *Drilling & Production Technology*, 2021, 44(4): 119–122.
- [47] 李骥然, 赵博, 米凯夫, 等. 旋转下套管技术在川渝页岩气开发中的应用[J]. *石化技术*, 2020, 27(7): 90–92.
LI Jiran, ZHAO Bo, MI Kaifu, et al. Application of top drive casing running technology in Sichuan and Chongqing shale gas exploration and development[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2020, 27(7): 90–92.
- [48] 张国田, 邹连阳, 黄衍福, 等. 顶驱下套管装置的研制[J]. *石油机械*, 2008, 36(9): 82–84.
ZHANG Guotian, ZOU Lianyang, HUANG Yanfu, et al. Development of top-drive casing-running device[J]. *China Petroleum Machinery*, 2008, 36(9): 82–84.
- [49] 江乐, 梅明佳, 段宏超, 等. 华H50-7井超4 000 m水平段套管下入研究与应用[J]. *石油机械*, 2021, 49(8): 30–38.
JIANG Le, MEI Mingjia, DUAN Hongchao, et al. Investigation into casing running in over 4 000 m long horizontal-section of Well Hua H50-7[J]. *China Petroleum Machinery*, 2021, 49(8): 30–38.
- [50] 焦亚军, 陈安环, 何方雨, 等. 漂浮下套管技术在浅层页岩气水平井中的应用及优化[J]. *天然气工业*, 2021, 41(增刊1): 177–181.
JIAO Yajun, CHEN Anhuan, HE Fangyu, et al. Application and optimization of floating casing running technology in shallow shale gas horizontal wells[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(supplement 1): 177–181.
- [51] 刘斌辉, 唐守勇, 曲从锋, 等. 页岩气水平井固井趾端压裂滑套的研制[J]. *天然气工业*, 2021, 41(增刊1): 192–196.
LIU Binhui, TANG Shouyong, QU Congfeng, et al. Development of toe fracturing sleeve for shale gas horizontal well cementing[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(supplement 1): 192–196.
- [52] 赵常青, 胡小强, 张永强, 等. 页岩气长水平井段防气窜固井技术[J]. *天然气工业*, 2017, 37(10): 59–65.
ZHAO Changqing, HU Xiaoqiang, ZHANG Yongqiang, et al. Anti-channeling cementing technology for long horizontal sections of shale gas wells[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(10): 59–65.
- [53] 黄海鸿. 页岩气水平井固井水泥浆体系研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
HUANG Haihong. Cementing slurry system of horizontal well in shale gas[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.
- [54] 赵常青, 谭宾, 曾凡坤, 等. 长宁—威远页岩气示范区水平井固井技术[J]. *断块油气田*, 2014, 21(2): 256–258.
ZHAO Changqing, TAN Bin, ZENG Fankun, et al. Cementing technology of horizontal well in Changning–Weiyuan shale gas reservoir[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2014, 21(2): 256–258.
- [55] 陈雷, 杨红歧, 肖京男, 等. 杭锦旗区块漂珠-氮气超低密度泡沫水泥固井技术[J]. *石油钻探技术*, 2018, 46(3): 34–38.
CHEN Lei, YANG Hongqi, XIAO Jingnan, et al. Ultra-low density hollow microspheres-nitrogen foamed cementing technology in Block Hangjinqi[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(3): 34–38.
- [56] 赵福豪, 黄维安, 雍锐, 等. 地质工程一体化研究与应用现状[J]. *石油钻采工艺*, 2021, 43(2): 131–138.
ZHAO Fuhao, HUANG Weian, YONG Rui, et al. Research and application status of geology-engineering integration[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(2): 131–138.

[编辑 陈会年]