

文章编号: 1673-2677(2026)02-0041-08

DOI: 10.12388/j.issn.1673-2677.2026.02.005

引用: 王建华, 李润川, 倪晓晓, 等. 国内外页岩油气钻完井技术进展及攻关方向[J]. 新疆石油天然气, 2026, 22(2): 41-48.

Cite: WANG Jianhua, LI Runchuan, NI Xiaoxiao, et al. Progress and research directions of shale oil and gas drilling and completion technology in China and abroad[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2026, 22(2): 41-48.

国内外页岩油气钻完井技术进展及攻关方向

王建华¹, 李润川², 倪晓晓¹, 汪海阁¹

(1. 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 北京昌平 102206; 2. 中国石油西南油气田分公司, 四川成都 510051)

摘要: 水平井和体积压裂技术的关键突破推动页岩油气产业实现了跨越式发展, 显著重构了全球能源格局。调研国内外页岩油气水平井钻完井技术的最新进展, 从井身结构、旋转导向、自动化钻机、智能化钻井、高性能钻井液与防漏堵漏、压裂装备及监测技术等方面进行了全面对比分析, 国内在钻井周期、水平段长度、“一趟钻”比例等方面与国外差距明显, 亟需在自动化钻机、新一代导向工具、高效聚晶金刚石复合片(PDC)钻头、大扭矩螺杆钻具、体积压裂和监测等方面进行攻关, 提高长水平段“一趟钻”比例和单井产量, 推进我国页岩油气钻完井技术向数字化和智能化转型, 为我国页岩油气革命提供技术支撑。

关键词: 页岩油气; 水平井; 钻完井; 压裂

中图分类号: TE24; TE357

文献标识码: A

Progress and Research Directions of Shale Oil and Gas Drilling and Completion Technology in China and Abroad

WANG Jianhua¹, LI Runchuan², NI Xiaoxiao¹, WANG Haige¹

(1. CNPC Engineering Technology R&D Company Limited, Changping 102206, Beijing, China; 2. PetroChina Southwest Oil & Gas-field Company, Chengdu 510051, Sichuan, China)

Abstract: The vital technological breakthroughs in horizontal drilling and multi-stage hydraulic fracturing have promoted a great leap in the development of the shale oil and gas industry and profoundly reshaped the global energy landscape. This study reviewed the latest technological advances in horizontal drilling and well completion for shale oil and gas both in China and internationally. A comprehensive comparative analysis was conducted across the casing program, rotary steering, automated drilling rigs, intelligent drilling, high-performance drilling fluids and lost circulation prevention and control, as well as fracturing equipment and monitoring technologies. The drilling time, horizontal wellbore length, and "one-trip" ratio in China showed considerable room for improvement, compared to those abroad. Therefore, efforts of research and development shall be strengthened for automated drilling rigs, next-generation rotary steering tools, high-efficiency polycrystalline diamond compact (PDC) bits, high-torque screws, and multi-stage fracturing and monitoring technologies, to enhance the "one-trip" ratio of long horizontal wellbores and boost production per well, promote the digital and intelligent transformation of drilling and completion technologies in China, and provide strong technical support for China's shale oil and gas revolution.

Key words: shale oil and gas; horizontal well; well drilling and completion; fracturing

北美页岩油气产区主要位于海恩斯维尔、二叠系及马塞勒斯等地区, 其地质构造稳定, 油气分布呈现“西油东气”格局。其中, 页岩气技术可采资源量达

$32.88 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[1], 页岩油储量 $79.11 \times 10^8 \text{ t}$ 。2024年度, 页岩油气完钻井近万口(9 300口), 实现页岩油产量 $4.4 \times 10^8 \text{ t}$ 、页岩气产量 $8 703 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[2-3]。其主体开发

基金项目: 新型油气勘探开发国家科技重大专项“高效能井筒工作液”(2025ZD1401300); 中国石油青年科技专项“超支化聚合物调控油基钻井液流变特性及作用机理研究”(2024DQ03107)。

作者简介: 王建华(1981—), 2008年毕业于中国石油大学(北京)油气井工程专业, 正高级工程师, 博士生导师, 长期从事钻完井液研发工作。(E-mail)wjhdri@cnpc.com.cn

模式采用“水平井结合分段体积压裂”技术体系,钻井工程普遍采用二开井身结构设计,水平段长度多集中于3 000~3 500 m,钻井周期为15~20 d,当前最长水平井段纪录已突破6 000 m,“一趟钻”(涵盖造斜段与水平井段)应用比例持续提升。单井初始产能60~2 000 t/d,估算单井最终可采储量(Estimated Ultimate Recovery, EUR)可达 $5\times10^4\sim10\times10^4$ t。

中国页岩油气地质资源丰富,中-高成熟度页岩油地质资源量约 504×10^8 t,页岩气地质资源量达 86.4×10^{12} m³。2024年全国页岩油产量达到 600×10^4 t,页岩气产量近 250×10^8 m³[4]。中国石油已建成陇东、吉木萨尔、古龙3个国家级页岩油示范区,以及长宁-威远、昭通2个国家级页岩气示范区;中国石化在涪陵和济阳拗陷建立了页岩油气开发示范区[5-8]。开发主

体采用“水平井+体积压裂”技术体系,平均水平段长度1 500~2 000 m,单趟钻最高进尺突破2 000 m。单井初始产能15~50 t/d, EUR为 $1.8\times10^4\sim2.5\times10^4$ t。

与北美前沿技术相比,我国页岩油气钻完井技术在钻井周期、水平段长度、“一趟钻”比例等方面存在明显差距,亟需在高端工具、装备以及自动化和智能化等技术方面进行迭代升级。

1 北美钻完井技术新进展

为支撑页岩油气高效开发,北美地区在井身结构优化设计、智能旋转导向钻具系统、高性能水基钻井液体系及钻井全流程自动化系统等方面开展重点攻关,推动了钻井周期、水平段长度等关键指标持续刷新纪录(表1)。

表1 北美部分超长水平井指标^[9]
Tab. 1 Indicators of some ultra-long horizontal wells in North America^[9]

区块	井号	垂深/ m	水平段 长度/m	井深/ m	钻井 周期/ d	页岩气单井 最高月产量/ (10 ⁴ m ³)	页岩油单井 最高月产量/ t
马塞勒斯	DAHN-TAHN 4H	2 404.3	6 205.7	8 897.7	6	1 634.6	0
马塞勒斯	DRIFT RIDGE 3H	2 490.5	6 128.9	8 717.3	6	1 781.3	0
马塞勒斯	HEYL 1H	2 240.6	6 162.8	8 251.2	6	1 909.9	0
马塞勒斯	ROBERT BONE BRK 10H	1 873.0	6 320.6	8 310.7	6	775.0	2 649.2
特拉华	RED HILLS FEDERAL 504H	3 778.9	6 448.3	6 909.2	10	352.6	7 473.1
马塞勒斯	MAC 4H	2 446.3	6 177.7	8 584.7	12	2 168.3	0
马塞勒斯	KUHN 4H	2 417.4	6 311.8	8 870.9	12	2 139.2	0
米德兰	CLARICE STARLING SUNDOWN D 4542WA	2 165.9	6 362.1	8 635.6	20	105.0	5 606.8
尤蒂卡	GABRIEL SW WEL JF 2H	3 097.4	7 294.8	10 374.2	20	3 673.7	0
马塞勒斯	MAC 12H	2 446.3	6 220.4	8 829.1	20	2 317.7	0
马塞勒斯	SGL A 5H	1 931.5	6 388.3	8 536.5	21	1 906.8	0

1.1 钻井技术

1.1.1 U型水平井

U型水平井也称为“马蹄形井”,如图1所示。第一口U型水平井由切萨皮克能(Chesapeake Energy)公

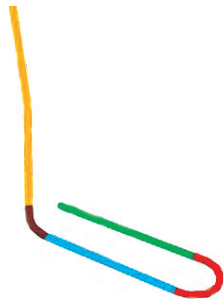


图1 U型水平井井眼轨迹示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wellbore trajectory of horizontal wells with U-turn laterals

司于2020年在得克萨斯鹰滩(Eagle Ford)区块钻成,造斜段和转弯段的造斜率达8°/30 m,水平段总长度超过3 000 m,单井产量与两口水平井相当,而钻井成本节约350万~400万美元。钻井工具和钻具组合优选了适应高狗腿度的设备,并确保在整个钻进过程中的井筒清洁,其关键工具有螺杆、随钻扩眼工具、水力振荡器。

1.1.2 自动化钻机

自动化钻机主要由大扭矩顶驱、机器人管材处理手、机器人排管机械手、机器人管材给料机和钻井平台机器人构成。自动化作业由Smart Suite工控系统、Canrig顶驱和钻台机器人协同完成,实现钻台自动化施工。2021年10月在Permian盆地完成业界第一口全流程自动化钻井,完钻井深6 071 m,平均钻井周期由16 d缩短到12 d,缩短25%。

1.1.3 智能化钻井软件

国际油服公司经过多年研究开发了多种软件,例如K&M的Extended Reach Architect(ERA,提效60%)、斯伦贝谢的DrillOps和Pason的Drilling Advisory System(DAS)软件。其中DAS软件已在北美270余部钻机完成了2 000余口水平井施工作业指导,提速30%以上。2023年,巴肯地区与未使用智能化钻井软件的邻井相比,平均机械钻速由48.7 m/h提升至60 m/h,平均起钻时间缩短了34%,水平段均实现了“一趟钻”,水平段平均钻井周期从99 h降低到54 h,平均日进尺达到590 m(增加了28%),平均钻井周期缩短至11 d,展现出智能化钻井软件的强大优势。

1.1.4 新一代导向系统

Enteq公司开发出的新型钻头旋导工具Steer-At-Bit Enteq Rotary(SABER)是一种压差式钻头旋转导向工具,利用伯努利原理,通过调整钻头内部流体的流向改变喷嘴间压差实现在钻头端面导向,调整精度可达 $\pm 0.1^\circ$,工作温度达175℃,耐压137.9 MPa,设计寿命达500 h。Permian盆地Wolfcamp页岩层使用SABER工具相较于液压驱动旋转导向系统的机械钻速提高18%,靶区半径误差小于2 m,因工具故障导致的停机减少70%以上。斯伦贝谢公司开发出了Neo-Steer CLx at-bit steerable system(ABSS)钻头导向系统^[10-11],它是一种近钻头旋转导向工具,如图2所示,机械钻速和储层钻遇率得到显著提高。在马塞勒斯(Marcellus)页岩区块,“一趟钻”完成直井段、造斜段和水平段,总进尺4 212 m,91%的井眼控制在设计轨迹1.2 m区域范围内。在DJ区块,“一趟钻”完成直井段、造斜段与水平段,总进尺达到了4 609.5 m,平均机械钻速159.4 m/h。



图2 近钻头导向系统

Fig. 2 At-bit steerable system

1.1.5 高性能钻井液

海恩斯维尔(Haynesville)地区主要采用无土相油基和合成基钻井液体系,使用占比高达70%。其中哈里伯顿的INTEGRATE无土相柴油基钻井液在环空当量循环密度(Equivalent Circulating Density,ECD)控制、纳米封堵和固控等方面技术成熟,实现水平段长度突破6 000 m^[12-13]。

高性能水基钻井液核心处理剂主要为胺基抑制剂、硅酸盐、纳米材料等,其润滑性、抑制性等关键性能接近油基,在页岩地层应用的平均水平段长度大于2 500 m,最长水平位移超过5 000 m。

1.1.6 页岩油气水平井固井技术

在固井流体方面,DuraSet™和ElastiCem弹塑性/韧性水泥性能指标为抗温232℃,密度1.1~2.5 g/cm³,弹性模量3~8 GPa,强度14~35 MPa。与此同时,配套了驱油型的Tuned Spacer水基隔离液和Mud Flush冲洗液等,其抗温204℃,密度1.1~2.6 g/cm³,保障了油基及水基钻井液条件下高效驱替及界面润湿反转。配套软件方面,OptiCem固井优化设计和WellLife Service井筒密封分析等软件能够针对性地分析体积压裂时水泥环的复杂应力分布及破坏条件,进一步指导施工参数优化及水泥浆配方设计^[14]。

1.2 水力压裂技术

北美水力压裂技术以“水平井完井+多簇射孔+滑溜水携砂+石英砂支撑+多段压裂+裂缝监测”为主。压裂工艺参数为页岩气段长40 m,页岩油段长70 m,段内4~15簇,簇间距10~15 m,每簇2~6孔^[15]。压裂液以滑溜水为主,用液强度20~35 m³/m;支撑剂以小粒径(40/70目+100目)石英砂为主,加砂强度3.0~4.5 t/m。同时,配套成熟的压裂模拟优化软件平台,如PETREL平台、Kinetix、Fracman、JewelSuite等。

1.2.1 大型压裂装备及管汇

压裂装备及管汇向自动化和电驱化转变。斯伦贝谢StimCommander系统实现了地面装备全自动化控制,施工效率提高25%。哈里伯顿公司Zeus压裂装备系统实现了全面电驱化,减排达45%。FMC公司的iComplete管汇系统采用法兰连接大口径管汇、全自动控制阀门开关,减少50%安装时间,减少了高压区面积,提升了目视化管理质量,节省成本30%^[16-17]。

1.2.2 压裂监测技术

目前主要形成了近井筒监测技术和新型远场裂缝监测技术。近井筒监测技术通过从井口主动发射声波,接收反馈声波信息,经软件解释后获得精确的“有效”裂缝几何尺寸,定量测量缝网的复杂指数、射孔连通质量和导流能力。新型远场裂缝监测技术通过捕捉裂缝内电导率随空间和时间的变化,可推断出压裂液的位置及其运动趋势,从而避免破坏性的流体侵入邻井或造成应力干扰,并改善裂缝几何形状^[18-19]。

1.2.3 干粉减阻剂在线混配技术

与免混配液体减阻剂(乳液,其中减阻成分占30%,溶剂占70%)相比,干粉减阻剂在线混配技术中

化学品的有效成分达100%,不仅大幅降低了包装及运输等成本,且熟化时间仅为2~5 min(人工大于1 h)。因去除了溶剂化学品,在活性成分同剂量下液体黏度提升15%左右,降本作用突出并展现出更优的性能。Hibernia Resource公司于2020年3月使用干粉减阻剂在线混配技术在现场应用了17口井,减阻剂综合降本30%~37%。

1.2.4 复合桥塞

可溶桥塞的密封可靠性尚存争议,复合桥塞仍占据市场主流。北美地区复合桥塞应用占比约80%^[20],具有显著的低成本优势(可溶桥塞单支成本较复合桥塞高出240美元);同时,可溶桥塞易发生密封不严、工具滑移等问题,导致储层改造不充分,相比之下复合桥塞作业效果更稳定可靠。

1.2.5 小粒径支撑剂

考虑低沉降和高运移效率,支撑剂不断向微小粒径发展。整体以小粒径(40/70目+100目)为主,其中100目粒径支撑剂占特拉华(Delaware)盆地总使用量的80%以上^[21]。近5年来,逐渐采用粒径200目甚至更小的微支撑剂。美国Silica公司开发了Micro Stim(200目)和Micro Stim Plus(325目)两种微支撑剂,在完井设计基本一致的情况下,经过300多天的生产,使用微支撑剂压裂井的总体产量平均提高了13%。

1.2.6 基于膨胀管井筒重构的水平井重复压裂技术

与“套中固套”作业相比,采用膨胀管重构井筒后内径更大,更有利于后续压裂及生产作业。以 $\Phi 127$ mm套管井筒重构为例,采用 $\Phi 89$ mm膨胀管井筒重构后内径达85 mm,而采用 $\Phi 89$ mm套管固井重构后内径为76 mm,且膨胀管重构后井筒过流面积是“套中固套”的1.25倍^[22]。亿万奇公司在Barnett、Eagle Ford、Anadarko等盆地应用膨胀管重构井筒1 100余口井,单井产量提高1.0~1.5倍。

2 国内钻完井技术新进展

国内开发页岩油气的主体技术为“大平台+长水平段”,最大平台井数达31口,最长水平段5 060 m。古龙等主要页岩油区块储层钻遇率达99.9%,各区块“一趟钻”最高进尺均突破2 000 m。

2.1 钻井技术

2.1.1 CG STEER旋转导向钻井系统

中国石油川庆钻探开发出CG STEER旋转导向钻井系统,耐温175℃、造斜能力12.5°/30 m^[23]。在四川致密气区块作业144口井、进尺26.48×10⁴ m,44口井实现“一趟钻”完钻,单井钻井周期从30 d降到15 d以内;

在长庆油田、新疆油田、辽河油田的页岩油区块共计作业19口井,进尺2.78×10⁴ m,其中在长庆油田页岩油H100-28井实现造斜段和水平段“一趟钻”,单趟进尺2 311 m,创造了国产旋转导向单次施工最长纪录。

2.1.2 裂缝性地层油基钻井液堵漏技术

结合桥堵材料“站得住”和水泥固化的双重优点,采用在桥堵材料表面覆膜的处理工艺,中国石油集团工程技术研究院有限公司(以下简称“中石油工程院”)开发出温压响应型堵漏材料,抗温50~200℃,1~4 mm缝板的正/反向承压≥15 MPa(常规惰性桥堵材料无反向承压),更适用于有“呼吸”效应的裂缝性地层^[24]。该技术在新疆油田、西南油气田、长庆油田等地区的复杂裂缝性漏失地层应用40余井次,一次堵漏成功率94%。其中新疆油田JHW79-13井西山窑组裂缝发育,前期采用3次桥堵、2次水泥堵漏均失败,应用温压响应堵漏材料一次堵漏成功,最高承压5.8 MPa,且后期无返吐,循环排量从堵漏前的20 L/s提高至31 L/s,密度由1.42 g/cm³提高至1.47 g/cm³。

2.1.3 膨胀管堵漏技术

中石油工程院研制的膨胀管膨胀后管体性能可达到N80钢级,抗内压46.3~63.4 MPa,抗外挤15.19~29.4 MPa。 $\Phi 299$ mm×14 mm膨胀管在西南油气田足203H5平台2口井分别完成666 m和828 m封堵作业,解决了嘉陵江组恶性井漏(前期化学堵漏耗时近3个月),钻井液密度由1.07 g/cm³提高至1.85 g/cm³,有效提高了地层承压能力^[25]。

2.1.4 油基钻井液性能在线监测装置

油基钻井液性能在线监测装置可在50℃或65℃条件下实现出口钻井液表观黏度、塑性黏度、动切力、动塑比、漏斗黏度、初切力、终切力、密度、温度、固相含量、API滤失、高温高压(HTHP)滤失量、油水比、破乳电压等14项性能参数的实时监测^[26],与人工手动测量结果相比,在线监测装置全套数据监测误差≤5%,有效提高现场监测数据的准确率和时效性。

2.2 压裂技术

国内页岩油气压裂参数表现为主体改造段长65 m,单段簇数3~10簇,簇间距10~15 m,支撑剂类型为石英砂,加砂强度3~5 t/m,用液强度25~30 m³/m,压裂时效为每天2~5段。在压裂液、改造段长、簇间距、簇数、加砂强度等参数方面与北美基本相当,在压裂设计软件、设备自动化程度、裂缝监测等方面与北美有一定差距^[27]。

2.2.1 膨胀管井筒重构技术

国内首口膨胀管井眼重构的重复压裂井为新疆

油田MaHW6274井,井深5 152 m、水平段长1 100 m,采用 $\Phi 89\text{ mm}\times 7\text{ mm}$ 膨胀管分5段实施1 041 m井筒重构作业,重构后内径85 mm,环空密封压力达到100 MPa^[28]。重复压裂后含水率由100%逐步降至51.6%,最高日产油27 t,平均日产油11 t,累计产油6 500 t。

2.2.2 光纤监测数据解释技术

中国石油研发的AnySense光纤监测解释软件,具备压裂进液进砂、井筒漏失、两相流产液剖面、暂堵有效性评价等解释功能。开发的高精度调制解调设备DTS,温度分辨率0.01 °C,空间分辨率0.12 m;DAS设备频率范围0.005~50 kHz,空间精度1 m。在新疆油田、辽河油田等现场应用3井次,有效识别了段、簇的进液量、产液量,为压裂效果评估和生产优化调整提供重要支撑^[29]。

3 技术挑战与攻关方向

3.1 国内与北美钻完井技术指标对比分析

与北美相比,我国油气藏地质条件更为复杂,尤其是陆相页岩油埋深大、非均质性强,面临巨大的效益开发挑战。

PDC钻头技术方面,美国的PDC钻头耐磨性、攻击性、可导向性强,已全面实现二开造斜段+水平段(大于3 000 m)“一趟钻”;国内的PDC钻头在耐磨性、抗冲击性、热稳定性方面还有差距,页岩水平段单趟进尺普遍不超过1 500 m^[30]。

旋转地质导向技术方面,北美的推靠式、指向式和复合式导向工具较为成熟,如Archer、AutoTrak Curve、iCruise、NeoSteer等七类工具,尺寸规格齐全,耐温175 °C以上,最大造斜率18°/30 m;国内已研制出推靠式旋转导向系统,耐温175 °C,稳定造斜率12.5°/30 m,指向式旋转导向工具尚处于样机试验阶段,在可靠性、抗高温能力、系列化等方面与国外存在一定差距,缺乏造斜率15°/30 m以上的高造斜率旋转导向技术^[23]。

自动化、智能化钻井技术方面,北美研发了钻台机器人、起下钻自动控制、自动送钻系统、自动控压钻井等,交流变频电驱动自动化钻机应用率达90%以上,远程决策指挥软件发挥重要作用。国内研发了“一键式”7 000 m自动化钻机,实现了起下钻等工况流程化作业、自动送钻、地面和二层台无人化,但在全流程自动化、连续管智能作业等方面依旧无法实现自动化,技术仍需攻关。

井筒工作液方面,国外的水泥浆体系抗温240 °C,密度1.1~2.6 g/cm³,弹性模量3~8 GPa,强度14~35 MPa,

以无土相油基、合成基油基钻井液为主。哈里伯顿、斯伦贝谢、Newpark等公司个性化水基钻井液性能优异,钻进水平段超5 000 m,机械钻速达30~80 m/h,“一趟钻”比例100%。国内水泥浆体系抗温220 °C,密度1.2~2.5 g/cm³,弹性模量4~8 GPa,强度20~40 MPa。油基钻井液以常规柴油/白油基钻井液为主,水平段最长达3 583 m;已研发成功的低固相防塌、反渗透高性能水基钻井液,钻进水平段突破5 060 m^[13],密度最高2.4 g/cm³的抗温240 °C,抗饱和盐钻井液体系已应用于深地塔科1井,为我国首口万米深井钻探提供了有力支撑^[31]。

水力压裂技术方面,北美压裂工艺参数为页岩气段间距40 m,页岩油段间距70 m,每段4~15簇,簇间距10~15 m,加砂强度3~5 t/m,总裂缝410~650条。国内压裂技术改造段长、簇间距、簇数、加砂强度等参数与北美基本相当,但压裂设计软件、设备自动化程度、裂缝监测等方面尚处于起步阶段,模块研发不齐全,与北美相比存在一定差距^[32]。

3.2 国内页岩油气开发面临的技术挑战

国内页岩油气开发已取得了长足进展,但仍然面临一些技术挑战,主要表现在以下方面。

1)川渝深层页岩气整体面临的恶性井漏、套变和压窜问题依然突出。恶性井漏主要发生在须家河-嘉陵江不整合面和裂缝发育地层、茅口组采空区。2023年井漏发生率高达20%以上,其中严重漏失(漏速大于30 m³/h)占比5%~8%,单井堵漏成本平均增加300万~500万元,严重漏失可导致工期延误1~2周。套变和压窜也较频繁,2023年深层页岩气井套变发生率约10%~15%,主要集中在中深层(3 500~4 500 m)区块,如泸州、长宁、威远等区域,单井套变处理成本平均增加200万~400万元,部分复杂井修井周期延长7~15 d;压窜发生率约5%~8%,高发于断层发育区(如川东高陡构造带)和薄隔层区域,单井压窜可造成10%~20%的压裂液无效注入,部分井产能下降15%~30%。

2)陆相页岩油钻井技术区域发展不平衡,部分区块甜点钻遇率、“一趟钻”实现比例较低,且钻井周期长、固井质量差、钻井成本高。针对夹层型页岩,非叠合区钻井技术相对成熟,叠合区安全钻井难度大、固井优质率低。针对混积型页岩,区域差异性大,钻井周期78~170 d,复杂情况多,钻井液适应性和固井质量差。松辽盆地古龙页岩油二开井身中的泥纹型页岩结构和渤海湾井壁存在垮塌严重、钻井周期长、固井优质率低等问题,需要针对性地优化方案设计,不断完善钻井技术。

3)页岩油气压裂面临地质条件复杂、降本增效难度大的挑战。随着页岩气向深层进军,地质条件更加复杂,套变严重影响产能建设与高效开发;页岩油单井EUR总体偏低,单井产量差异大。亟待在低成本滑溜水、立体压裂监测与调控、矿场压裂试验等方面加强攻关,推进经济压裂、精细调控、精确造缝,实现压裂开发效益建产。

3.3 攻关方向

结合国内和北美页岩油气钻完井技术研究进展及国内目前存在的差距和面临的技术挑战,提出以下几点攻关方向。

1)持续培育一批重大原创性科学成果,支撑引领页岩革命工程目标的实现。根据不同地区的漏失特点,研发适配的材料和工具,提升页岩油气恶性井漏一次堵漏成功率;增强高效PDC钻头耐磨性、抗冲击性、热稳定性和可导向性;提升大扭矩螺杆输出扭矩并延长使用寿命达200 h以上;加快全可溶桥塞向全金属可溶桥塞和高性能复合桥塞升级;持续推进高效PDC钻头、大扭矩螺杆、可溶桥塞等规模应用。重点突破以个性化钻头与大扭矩螺杆组合形成的超长水平段“一趟钻”技术,单趟进尺超3 000 m,全面提升“一趟钻”钻井能力。

2)加快新一代导向工具研发,不断提高储层钻遇率和钻井效率。加速国产15°/30 m高造斜率、耐175 °C高温旋转导向工具的研发,替代进口工具,降低工程成本。研发升级带伽玛成像、边界探测功能和适用于油基钻井液的近钻头地质导向系统等关键技术,打造集建模、轨道测控、综合评价为一体的智能旋转地质导向与决策系统,实现井筒智能导航,保障储层钻遇率和“一趟钻”比例。

3)大力推进数字化转型、智能化发展专项攻关,助力高质量发展。积极探索人工智能应用场景,建立人工智能、云计算与传统钻完井工程技术深度融合新模式,完善远程决策支持系统,加快向智慧工程、智能技术转型升级。研制钻井智能决策与优化控制系统、压裂工控软件系统、智能钻机与压裂装备、智能化井下工具等为代表的智能软件、装备、工具等。实现施工现场智能化、自动化应用占比15%以上,钻井实时优化与决策系统辅助“一键式”操控定向钻井,平均提速30%以上,大幅降低油气开采成本,提高单井产量。

4)加速推广压裂提产新技术应用落地,推动体积压裂全面升级。聚焦精准优化压裂设计,建立高精度地质模型和地质力学模型,加强不同页岩储层裂缝扩展、滑溜水携砂及缝内支撑等方面的基础研究,优化

压裂设计技术;攻关分布式光纤、井下电视等监测和解释技术,定量评价多簇裂缝开启及延伸,提高缝网复杂性,提高压裂动用范围;加快工具与装备升级,全面研发数智化压裂设备、工具、材料,加快电驱压裂应用,攻关国产压裂软件升级并替代国外软件,丰富地质工程一体化功能,打造绿色低碳、自动化智能化的体积压裂系统;推进膨胀管井筒重构的水平井重复压裂技术,提高单井累计产量。

4 结束语

尽管我国页岩油气钻完井技术取得了长足的进展,尤其是旋转导向、自动化钻机、智能化钻井、高性能钻井液与防漏堵漏、压裂装备及监测技术等方面都有所突破,但在高端工具、装备以及自动化和智能化等方面与北美前沿技术差距较大,今后应在自动化钻机、新一代导向工具、高效PDC钻头、大扭矩螺杆、体积压裂和监测等方面进一步攻关,提高长水平段“一趟钻”比例和储层钻遇率,推进我国页岩油气钻完井技术向数字化和智能化转型,为我国页岩油气革命提供技术支撑。

参考文献

- [1] MCMAHON T P, LARSON T E, ZHANG T, et al. Geologic characteristics, exploration and production progress of shale oil and gas in the United States: an overview[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(4): 807–828.
- [2] 邹才能, 朱如凯, 董大忠, 等. 页岩油气科技进步、发展战略及政策建议[J]. *石油学报*, 2022, 43(12): 1675–1686.
ZOU Caineng, ZHU Rukai, DONG Dazhong, et al. Scientific and technological progress, development strategy and policy suggestion regarding shale oil and gas [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(12): 1675–1686.
- [3] 孙龙德, 刘合, 朱如凯, 等. 中国页岩油革命值得关注的十个问题[J]. *石油学报*, 2023, 44(12): 2007–2019.
SUN Longde, LIU He, ZHU Rukai, et al. Ten noteworthy issues on shale oil revolution in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(12): 2007–2019.
- [4] 郭旭升, 胡宗全, 申宝剑, 等. 中国页岩油气源-储耦合类型划分及勘探意义[J]. *石油学报*, 2024, 45(11): 1565–1578.
GUO Xusheng, HU Zongquan, SHEN Baojian, et al. Classification and exploration significance of source-reservoir coupling types of shale oil and gas in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(11): 1565–1578.
- [5] 王志刚. 涪陵大型海相页岩气田成藏条件及高效勘探开发关键技术[J]. *石油学报*, 2019, 40(3): 370–382.
WANG Zhigang. Reservoir formation conditions and key effi-

- cient exploration & development technologies for marine shale gas fields in Fuling area, South China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(3): 370–382.
- [6] 崔宝文, 王瑞, 白云凤, 等. 古龙页岩油勘探开发进展及发展对策[J]. *大庆石油地质与开发*, 2024, 43(4): 125–136.
CUI Baowen, WANG Rui, BAI Yunfeng, et al. Exploration and development progress and development strategies of Gulong shale oil [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2024, 43(4): 125–136.
- [7] 李振川, 李冰青, 张胜鹏, 等. 吉木萨尔页岩油水平井钻井关键技术研究[J]. *钻采工艺*, 2024, 47(6): 159–166.
LI Zhenchuan, LI Bingqing, ZHANG Shengpeng, et al. Key technical research on horizontal well drilling in Jimsar shale oil [J]. *Drilling & Production Technology*, 2024, 47(6): 159–166.
- [8] 雍锐, 陈更生, 杨学锋, 等. 四川长宁-威远国家级页岩气示范区效益开发技术与启示[J]. *天然气工业*, 2022, 42(8): 136–147.
YONG Rui, CHEN Gengsheng, YANG Xuefeng, et al. Profitable development technology of the Changning-Weiyuan National Shale Gas Demonstration Area in the Sichuan Basin and its enlightenment [J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(8): 136–147.
- [9] 张家希, 于家庆, ROMAN Galchenko, 等. 北美非常规油气超长水平井优快钻井技术及实例分析[J]. *钻探工程*, 2021, 48(8): 1–11.
ZHANG Jiayi, YU Jiaqing, ROMAN Galchenko, et al. North America unconventional long lateral well fast-drilling technology with case study [J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(8): 1–11.
- [10] 苏义脑, 窦修荣, 高文凯, 等. 旋转导向系统研究现状与发展趋势[J]. *钻采工艺*, 2024, 47(3): 1–8.
SU Yinao, DOU Xiurong, GAO Wenkai, et al. Research status and development trends of rotary steerable system [J]. *Drilling & Production Technology*, 2024, 47(3): 1–8.
- [11] 苏义脑, 窦修荣, 高文凯, 等. 油气井随钻测量技术发展思考与展望[J]. *石油科学通报*, 2023, 8(5): 535–554.
SU Yinao, DOU Xiurong, GAO Wenkai, et al. Discussion and prospects of the development on measurement while drilling technology in oil and gas wells [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2023, 8(5): 535–554.
- [12] 孙金声, 刘凡, 程荣超, 等. 机器学习在防漏堵漏中研究进展与展望[J]. *石油学报*, 2022, 43(1): 91–100.
SUN Jinsheng, LIU Fan, CHENG Rongchao, et al. Research progress and prospects of machine learning in lost circulation control [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(1): 91–100.
- [13] 孙金声, 王韧, 龙一夫. 我国钻井液技术难题、新进展及发展建议[J]. *钻井液与完井液*, 2024, 41(1): 1–30.
SUN Jinsheng, WANG Ren, LONG Yifu. Challenges, developments, and suggestions for drilling fluid technology in China [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2024, 41(1): 1–30.
- [14] 李国栋. 胜利油田东部油区页岩油气水平井固井技术[J]. *天然气勘探与开发*, 2023, 46(1): 132–140.
LI Guodong. Cementing technologies for shale oil and gas horizontal wells, eastern oil block, Shengli oilfield [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2023, 46(1): 132–140.
- [15] 段洋, 李琴, 贾艳芬, 等. 北美非常规储层地应力预测技术发展现状与趋势[J]. *石油地质与工程*, 2023, 37(2): 43–50.
DUAN Yang, LI Qin, JIA Yanfen, et al. Development status and trend of in-situ stress prediction technology for unconventional reservoirs in North America [J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2023, 37(2): 43–50.
- [16] BARREE R D, MISKIMINS J L, SVATEK K J. Reservoir and completion considerations for the refracturing of horizontal wells [J]. *SPE Production and Operations*, 2018, 33(1): 1–11.
- [17] LOEHKEN J, YOSEFNEJAD D, MCNELIS L, et al. Determination of the near-wellbore pressure drop for dual casing in hydraulic fracturing and refracturing applications [C]//SPE International Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition. Richardson, Texas, USA: OnePetro, 2022.
- [18] 李跃纲, 宋毅, 黎俊峰, 等. 北美页岩气水平井压裂井间干扰研究现状与启示[J]. *天然气工业*, 2023, 43(5): 34–46.
LI Yuegang, SONG Yi, LI Junfeng, et al. Research status and implications of well interference in shale gas horizontal well fracturing in North America [J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(5): 34–46.
- [19] CHUN T, ZHU D, ZHANG Z, et al. Experimental study of proppant transport in complex fractures with horizontal bedding planes for slickwater fracturing [J]. *SPE Production and Operations*, 2021, 36(1): 83–96.
- [20] TAVASSOLI S, YU W, JAVADPOUR F, et al. Well screen and optimal time of refracturing: a Barnett shale well [J]. *Journal of Petroleum Engineering*, 2013, 2013: 817293.
- [21] LIANG F, SAYED M, AL-MUNTASHERI G A, et al. A comprehensive review on proppant technologies [J]. *Petroleum*, 2016, 2(1): 26–39.
- [22] KISELICA K, JENNINGS T. Re-fracturing the Appalachian Basin: an economic analysis [C]//SPE Eastern Regional Meeting. Charleston: SPE, 2019: SPE-196602-MS.
- [23] 冯思恒, 李雷. CG STEER旋转地质导向钻井系统推动非常规油气开发关键技术自主可控[J]. *钻采工艺*, 2022, 45(1): 69.
FENG Siheng, LI Lei. CG STEER Rotary Geosteering Drilling system promotes independence of key technologies for unconventional oil and gas development [J]. *Drilling & Production*

- tion Technology, 2022, 45(1): 69.
- [24] 王长豹, 程云, 马诚, 等. 裂缝性地层油基钻井液用堵漏材料的研究进展[J]. 当代化工, 2024, 53(11): 2621-2627.
WANG Changbao, CHENG Yun, MA Cheng, et al. Research progress of lost circulation materials for oil-based drilling fluids in fractured formation[J]. Contemporary Chemical Industry, 2024, 53(11): 2621-2627.
- [25] 郑有成, 郭建华. 长裸眼恶性漏失井膨胀管堵漏适用技术[J]. 天然气工业, 2023, 43(8): 98-107.
ZHENG Youcheng, GUO Jianhua. Application of expandable tubular plugging technology in long open hole wells with severe lost circulation[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(8): 98-107.
- [26] 王鹏, 刘伟, 张果. 钻井液性能自动监测装置的现状和改进建议[J]. 钻采工艺, 2022, 45(3): 42-47.
WANG Peng, LIU Wei, ZHANG Guo. Status quo and improvement suggestions of automatic monitoring equipment for drilling fluid performance[J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45(3): 42-47.
- [27] 赵金洲, 任岚, 蒋廷学, 等. 中国页岩气压裂十年: 回顾与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 121-142.
ZHAO Jinzhou, REN Lan, JIANG Tingxue, et al. Ten years of gas shale fracturing in China: review and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 121-142.
- [28] 张利伟, 李杰, 于会永, 等. 水平井膨胀管井筒重构技术研究及现场试验[J]. 钻采工艺, 2024, 47(5): 67-73.
ZHANG Liwei, LI Jie, YU Huiyong, et al. Research and field test of wellbore reconstruction technology based on expandable tubular for horizontal well[J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(5): 67-73.
- [29] 周明秀, 管英柱, 张国威, 等. 分布式光纤监测技术在水平井分段压裂中的应用[J]. 能源与环保, 2024, 46(2): 146-154.
ZHOU Mingxiu, Guan Yingzhu, Zhang Guowei, et al. Application of distributed fiber optic monitoring technology in segmented fracturing of horizontal wells[J]. China Energy and Environmental Protection, 2024, 46(2): 146-154.
- [30] 呼怀刚, 黄洪春, 汪海阁, 等. 国内外PDC钻头新进展与发展趋势展望[J]. 石油机械, 2024, 52(2): 1-10.
HU Huaigang, Huang Hongchun, Wang Haige, et al. New progress and development trends of PDC bits in China and abroad[J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52(2): 1-10.
- [31] 孙金声, 杨景斌, 吕开河, 等. 深层超深层钻井技术研究现状与展望[J]. 新疆石油天然气, 2025, 21(2): 1-14.
SUN Jinsheng, YANG Jingbin, LV Kaihe, et al. Research status and prospect of deep and ultra-deep drilling technology[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2025, 21(2): 1-14.
- [32] 翁定为, 雷群, 管保山, 等. 中美页岩油气储层改造技术进展及发展方向[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2297-2307.
WENG Dingwei, LEI Qun, GUAN Baoshan, et al. Progress and development directions of reservoir stimulation techniques for shale oil and gas in China and the United States[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2297-2307.
- (修改回稿日期: 2026-05-06 编辑: 丁艳艳)