

doi:10.11911/syztjs.2023030

引用格式: 袁建强. 中国石化页岩气超长水平段水平井钻井技术新进展与发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 81-87.

YUAN Jianqiang. New progress and development proposals of Sinopec's drilling technologies for ultra-long horizontal shale gas wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 81-87.

中国石化页岩气超长水平段水平井钻井技术 新进展与发展建议

袁建强

(中石化石油工程技术服务有限公司, 北京 100020)

摘 要: 为实现页岩气超长水平段水平井高效开发, 中国石化围绕页岩气地质选区评价、装备配套、降摩减阻、低成本高效地质导向、钻井参数分层优化、长寿命高效破岩工具及高效固井等技术进行攻关研究, 成功实施了水平段长度超过 2 700 m 的水平井 15 口、超过 3 000 m 的水平井 5 口, 初步形成了 4 000 m 页岩气超长水平段水平井钻井技术, 有力支撑了东胜区块、焦石坝区块等页岩气的高效开发。概述并分析了中国石化页岩气超长水平段水平井钻井技术的新进展, 分析认为, 与国外相比, 中国石化页岩气超长水平段水平井钻井技术仍存在较大差距, 因此建议重点攻关地质选区及评价、关键提速工具、高效钻井液体系、降摩减阻和套管下入与长效封固等关键工具与技术, 为实现超长水平段水平井安全高效钻井提供技术支撑。

关键词: 页岩气水平井; 超长水平段; 钻井技术; 技术进展; 发展建议; 中国石化

中图分类号: TE243

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)04-0081-07

New Progress and Development Proposals of Sinopec's Drilling Technologies for Ultra-Long Horizontal Shale Gas Wells

YUAN Jianqiang

(Sinopec Oilfield Service Corporation, Beijing, 100020, China)

Abstract: In order to achieve the efficient development of ultra-long horizontal shale gas wells, Sinopec made breakthroughs in technologies such as evaluation of geological area selection, supporting equipment, friction reduction, low-cost and efficient geo-steering, layered optimization of drilling parameters, long-life and efficient rock breaking tools, and efficient cementing, etc. As a result, 15 horizontal wells with a horizontal section of more than 2 700 m and 5 wells with a horizontal section exceeding 3 000 m have been drilled. The technical system for the drilling of horizontal shale gas wells with an ultra-long horizontal section of 4 000 m was formed preliminarily. The above have provided strong support for efficient shale gas development in the Dongsheng Block and the Jiaoshiba Block. However, there is still a big gap between Sinopec's shale gas ultra-long horizontal well drilling technologies and those of foreign countries. Hence, it was suggested that breakthroughs should be mainly made in tools and technologies including the selection and evaluation of geological areas, key speed-up tools, efficient drilling fluid systems, friction reduction techniques, and casing running and long-term cementing technologies, etc. In this way, it would provide technical support for realizing safe and efficient ultra-long horizontal well drilling.

Key words: shale gas horizontal well; ultra-long horizontal section; drilling technology; technological progress; development proposal; Sinopec

超长水平段水平井一般指水平段长度大于 3 000 m 的水平井。当前, 超长水平段水平井已经成

为北美页岩气开发的主要手段之一, 3 000~6 000 m 长水平段已经成为 Appalachia、Fayetteville 和

收稿日期: 2022-10-17; 改回日期: 2023-01-30。

作者简介: 袁建强 (1963—), 男, 湖南长沙人, 1985 年毕业于江汉石油学院钻井工程专业, 1992 年获石油大学 (北京) 油气井工程专业硕士学位, 2010 年获中国地质大学 (武汉) 矿产普查与勘探专业博士学位, 正高级工程师, 主要从事石油工程技术研究与管理。系本刊编委会副主任。E-mail: yuanjq.os@sinopec.com。

基金项目: 中国石化十条龙项目“复兴侏罗系陆相页岩油气水平井钻完井技术” (编号: P21078-6) 资助。

Haynesville 三大区域的主流开发模式。研究可知,单井水平段长度增加 20%,开发成本降低 10.7%^[1-3],且采用超长水平段水平井开发,可使用 1.3 口井的成本完成近 2 口井的产能。据统计,北美页岩气水平井水平段长度逐年增长,单井成本逐渐降低,2017—2018 年水平段长度突破至 6 366.00 m, Marcellus 区块 2018 年水平段长度超过 4 267.20 m 的井占比达 18%, Outlaw C11H 井水平段长度达到 5 943.60 m; Purple Hayes 1H 井水平段长度达 5 652.21 m^[4-5]。2019 年, Utica 地区完钻水平段长度大于 4 500 m 的水平井 18 口,水平段长度在 4 721~6 288 m^[6]。超长水平段水平井钻井技术为页岩气高效开发提供了技术支持。

近年来,中国石化通过持续的理论研究与技术攻关,在涪陵、南川等区块已经完成了多口超长水平段水平井施工,水平段长度由开发初期的 1 500~2 000 m 增至 3 000~4 000 m,目前累计完成水平段长度 2 700 m 以上的水平井 15 口。其中,2017 年完钻的 JY2-5HF 井水平段长度达到 3 065 m^[7],2021 年完钻的 SY9-6HF 井水平段长度 3 601 m^[8],2022 年完钻的 SY9-3HF 井水平段长度 4 035 m, JY18-S12HF 井水平段长度 4 286 m。通过持续优化长水平段水平井钻井工艺,目前已经初步形成了 4 000 m 超长水平段水平井钻井技术。笔者系统总结了中国石化超长水平段水平井钻井技术的新进展,结合勘探开发实践分析了当前存在的主要技术难点,并讨论了页岩气超长水平段水平井钻井技术发展前景,以期促进中国石化超长水平段水平井技术的发展。

1 超长水平段水平井钻井技术新进展

中国石化针对页岩气超长水平段水平井钻井中的井位优选、井眼轨迹控制、摩阻扭矩控制和井筒长效密封等主要难题,从地质评价选区、关键工具、井筒工作液等方面开展了技术攻关和现场实践,使页岩气水平井水平段长度取得新突破,初步形成了适用于具有中国页岩气地质特征的超长水平段水平井钻井技术,并完钻了 5 口超长水平段页岩气水平井,为页岩气的高效开发提供了技术支撑。

1.1 地质选区评价技术

地质选区评价是超长水平段水平井高效开发的核心关键之一,为解决超长水平段水平井井位部署、装备配套、地质建模等难题,开展了以构造单元评价、微构造及断裂体系评价、地层倾角评价、埋深

评价、储层非均质性评价和各向异性评价等为核心的超长水平段页岩气水平井选区评价研究,形成了超长水平段水平井地质评价选区原则:1)具备稳定构造单元,构造宽缓,变形弱;2)避开断层发育区,尽量规避天然裂缝发育破碎带;3)具备合理的埋深条件;4)沉积环境稳定,储层平面分布稳定,非均质性弱;5)避开高应力区,应力各向异性弱。

涪陵工区进行了超长水平段水平井部署与实施验证,一是在焦石坝主体区完成了超长水平段试验井 JY18-S12HF 井的部署论证,完钻水平段长 4 286 m;二是在东胜区块钻成了 SY9-3HF 井、SY9-6HF 井,水平段长度分别为 4 035 和 3 601 m。例如, JY18-S12HF 井完钻井深 7 161 m,水平段长 4 286 m,其所在构造位于焦石坝主体北东缘,西邻江东断鼻构造,构造整体宽缓、地层视倾角 $3.33^{\circ}\sim 7.68^{\circ}$,水平段埋深 2 600~2 800 m,中大尺度断裂不发育,水平段方位平行构造与断裂走向;地震曲率以空白、斑点特征为主,天然裂缝欠发育,实钻未发生大型漏失,应力场以弱拉张应力环境为主,应力集中效应弱,具备较好的井壁稳定条件,目的层发育一套深水陆棚相硅质页岩、黏土质硅质页岩,沉积厚度稳定。

1.2 超长水平段水平井装备配套优化技术

为适应超长水平段水平井强化参数需要,以地层破裂压力当量密度、钻井水力参数、钻井设备功率和钻井工具强度等性能参数为边界约束条件,建立了超长水平段水平井延伸能力评价模型^[9-10],分析了水平段延伸过程中悬重、泵压、扭矩等参数对钻井装备的性能要求,对钻井泵及顶驱等核心装备进行了优化升级,初步确立了超长水平段水平井装备的配套方案。

通过分析水平段长度与大钩提升能力的关系,优选 70 型钻机,最大钩载 4 500 kN;通过分析长水平段转速、水平段长度与扭矩,优选 500/750 t 双电机顶驱,最大载荷 4 500 kN,工作扭矩 50 kN·m(0~110 r/min 连续),最大扭矩 75 kN·m(间断)。为满足长水平段井筒清洁需求,提高环空返速,优选额定泵压为 52 MPa 的 F1600HL 高压钻井泵;根据井深及强化参数需求,优选压力等级 52 MPa 或 70 MPa 的鹅颈管、冲管、中心管和上下旋塞等管汇。

1.3 长水平段降摩减阻技术

针对长水平段钻井施工时摩阻高、岩屑易堆积、钻井液润滑性差和流态不稳定等难点^[11-13],研究应用了高性能油基钻井液及高效降摩减阻工具,保证了井下安全,提高了机械钻速。

1.3.1 高性能油基钻井液

利用研制的高效提切剂、高性能油基钻井液润滑剂, 构建适用于超长水平段水平井的高性能油基钻井液。

1) 高效提切剂。为增强钻井液的携岩能力, 提高井眼清洁效率, 研发了 SSC-HyMod 提切剂, 该提切剂通过高分子合成, 将清水基团与憎水基团合成具有 R1-X-R2 结构的油溶性聚合物材料, 其中清水基团主要为酰胺基或酰基基团, 该结构在油基钻井液中将通过静电引力或氢键与其他基团相互作用形成比表面积大的网络结构, 而分子中的长烷基直链之间也可以通过缔合作用形成三维网络结构, 实现增黏、提切的目的, 可维持油基钻井液塑性黏度稳定, 应用过程中, 动塑比可提至 0.35~0.45, 具有充分携岩、高效清洁井眼等优点, 在 JY18-S12HF 井等 10 口井中应用后, 动切力提高 50% 以上, 动塑比提高 30%~40%, 提切效果良好。

2) 高性能油基钻井液润滑剂。为降低长水平段摩阻、减小管柱磨损, 采用外循环高压反应技术, 以油酸为主剂, 加入含有硫、磷、氯的化合物, 形成具有极压功能基团的抗磨材料, 再与润滑液基液混配, 研制了高性能油基钻井液润滑剂, 其中极压抗磨剂成分在载荷面的凸起点上, 由于极压高温及新暴露的金属表面的高活性分子中的活性元素硫、磷、氯与金属产生化学反应形成硫化物、氯化物等低熔点物质, 形成牢固的极压膜, 降低了抗剪切强度, 从而达到降低摩擦系数的目的。润滑系数可降低 42.19%, 滑块摩阻系数 ≤ 0.0439 , 在涪陵、川渝、宜昌等地区应用 20 余井次, 钻进摩阻降低 15%, 起钻摩阻降低 30%, 润滑效果良好。

3) 强封堵、强抑制性油基钻井液。针对四川盆地目的层龙马溪组—五峰组页岩层理及裂缝发育、部分层段存在断层破碎带和井壁失稳风险高等特点, 研发了强封堵、强抑制性油基钻井液, 其配方为

基础油相+2.4% 主乳化剂+0.8% 辅乳化剂+氧化钙+有机土+26.0%CaCl₂ 溶液+纳米级封堵剂+氧化沥青+SSC-HyMod 提切剂+润湿剂+承压封堵降滤失剂+井眼强化剂+重晶石。室内评价试验表明, 与原用钻井液相比, 岩心回收率由 97.94% 提高至 99.24%, 膨胀率由 0.38% 降低至 0.25%, 滤失量降低 60.9%, 表明该钻井液具有良好的防塌抑制性, 可有效地维护超水平段井壁的稳定, 保障施工安全。该钻井液在现场应用 20 余口井, 其中 JY147-2HF 井完钻井深 7 006 m, 水平段长度 2 621 m, 完钻井径扩大率为 4.23%, 较邻井降低 52.6%, 实钻过程中未发生垮塌掉块, 上提摩阻稳定在 176.4~215.6 kN, 较邻井降低 32%, 施工期间起下钻作业顺利。

1.3.2 降摩减阻工具

为实现超长水平段岩屑高效返出, 降低井下摩阻, 研制了双螺旋随钻井壁修整器和清砂钻杆。

1) 双螺旋随钻井壁修整器。为了提高水平段岩屑返出效率, 实现降摩减阻, 结合 V 形叶片的造涡携砂能力和螺旋叶片的导流能力, 分析了螺旋线数、螺距与扩孔效果、井壁摩擦力的关系, 在保证微扩孔效果的基础上, 以接触摩擦力最小为目标, 研制了双螺旋随钻井壁修整器(见图 1)。螺旋结构锥度为 12°~18°, 2 个螺旋, 4 个螺旋翼, 螺距 390 mm, 螺旋翼上布置倒划眼齿, 实现了对井底岩屑床的抽汲及有效切削; 采用偏心结构设计, 提高了钻柱旋转作用下的岩屑床清理效果, 现场应用 30 余井次, 应用效果较好。例如, JY30-S7HF 井应用该工具后, 返砂量是理论返砂量的 1.67 倍, 完钻起钻水平段上提摩阻最大 280 kN, 下放摩阻最大 240 kN, 比同平台 JY30-S6HF 井降低 13%, 且水平段连续钻进 1 836 m 未进行短起下作业, 节约了 2 趟短起下作业时间; JY20-S1HF 井应用该工具后, 返砂量是理论返砂量的 1.50 倍, 完钻起钻水平段上提摩阻最大 240 kN, 下放摩阻最大 200 kN, 比同平台 JY20-S2HF 井降低 15%。

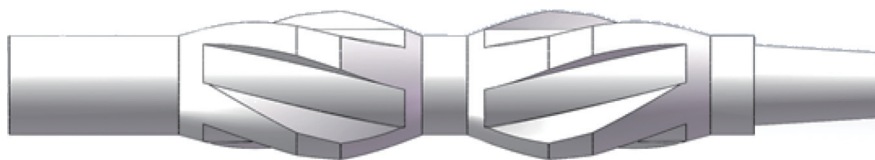


图 1 双螺旋随钻井壁修整器

Fig.1 Double helix wall trimmer with drilling

2) 清砂钻杆。为了提高环空钻井液携岩效果, 预防岩屑床的形成, 根据数值模拟结果, 在钻杆外

壁设置了螺旋槽道, 环空钻井液切向速度沿径向逐渐增大。同时, 流体动压力升高, 井壁处流体的动

能增加,环空钻井液流速增大形成紊流,高效清除贴近井壁的岩屑。JY13-S4HF井钻进2 875~4 724 m井段时,每隔450 m加入清砂钻杆,通井顺利,下钻摩阻58.8~78.4 kN,起钻摩阻117.6~147.0 kN。

1.4 低成本高效地质导向技术

针对超长裸眼水平段存在的轨迹控制难度大、地质导向困难和导向技术成本高等难点,中国石化在涪陵页岩气田大力推进了导向工具的研选与适应性研究以及国产旋转导向工具的研制,并取得了3个方面的重要进展。

1)通过综合考虑构造、倾角变化、水平段延伸能力和工具费用等因素,形成了涪陵页岩气田的导向工具研选标准和方法。

2)通过分析摩阻、扭矩和定向工作量,结合钻井周期,进行技术、经济性评价,采用常规LWD能够满足95%以上的页岩气水平井地质导向需求,基本实现了导向工具的“去旋导化”,单井导向工具费用还可节约一百万元以上^[11,14],SY9-2HF井中使用常规导向工具,费用节约60%以上,SY9-3HF井采用LWD完成4 035 m长水平段施工,创国内LWD施工水平段最长纪录。

3)为了解决井下钻具的精确控制难、井下信噪比低等问题,开发了多扇区矢量分解方法,设计了组合编码方法,研制了“经纬领航”Ⅰ型旋转导向系统,控制精度达到 $\pm 0.22^\circ$,信号上传解码率达94%,下传解码率达91%,仪器国产化率94%。该系统在JY70-S2HF井中“一趟钻”完成水平段进尺1 980 m,纯钻时间209 h,平均机械钻速9.47 m/h,不但实现了国产旋转导向工具在页岩气井中应用的实质性突破,而且验证了国产旋转导向工具在页岩气井的适应性和可靠性,为后续旋转导向工具应用和升级优化奠定了基础。

1.5 钻井参数分层优化

为了充分发挥装备、工具的提速潜力,实现不同参数搭配下钻机输入能量的最大化使用,建立了强化参数模型,形成了分层强化参数推荐图版。

1)强化参数模型。基于经典钻速方程,利用多元非线性回归方法,分层段拟合形成钻速指数、钻压指数、转速指数等关键参数,建立了分层强化参数模型^[15-16],模型符合率86%。

2)分层强化参数推荐图版。通过分析已钻井数据,优选各层位强化参数原则,差异化强化钻压、转速或排量,选取最优机械钻速目标,形成分层强化参数推荐图版(见图2)。在涪陵工区现场应用后,

机械钻速提高39.6%,钻井周期缩短38.5%。例如,SY9-2HF井三开钻压121.5 kN,排量28.94 L/s,较JY2-5HF井钻压提高25.3%,排量提高10.0%,全井钻井周期45.5 d,全井平均机械钻速11.03 m/h,机械钻速大幅提升。

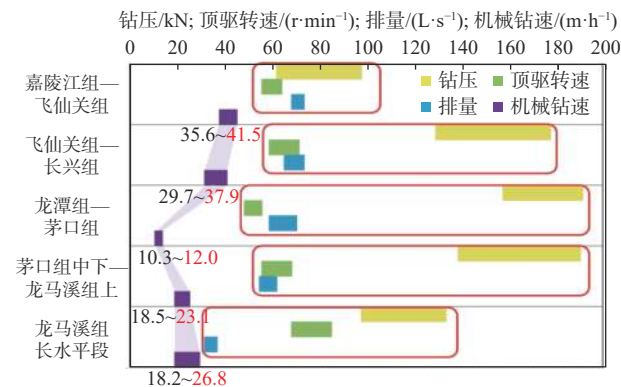


图2 分层强化参数推荐图版

Fig.2 Stratified reinforcement parameter recommended chart

1.6 长寿命高效破岩工具

针对页岩气水平段页岩地层硬度较高、含夹层等特点,研制应用了高效钻头和长寿命、大扭矩螺杆等关键破岩工具。

1)高效钻头。为提高水平段碳质页岩地层的钻进速度,针对易钻的龙马溪组⑤—⑧小层,研制了攻击性强、机械钻速快的 $\phi 215.9$ mm KSD1652AGR高效PDC钻头,采用浅锥形双圆弧击碎线形、斧形齿与三棱齿的异形齿组合^[17-18],控制PDC当量布齿密度为39~40;针对龙马溪组③小层及五峰组地层,优选高性能复合片,研制了耐磨性强、吃入能力好和定向可操控性强的 $\phi 215.9$ mm KMD1652ADGR高效PDC钻头,控制PDC当量布齿密度为46~47,采用五刀翼结构。现场应用结果表明,高效PDC钻头平均纯钻时间132.56 h,使用寿命增长30%以上,平均机械钻速10.36 m/h,提速40%。

2)长寿命、大扭矩螺杆。为解决常规螺杆扭矩小、寿命短,难以满足超长水平段水平井高效钻进需求的问题,研发了 $\phi 172.0$ mm长寿命大扭矩螺杆,采用修正线型设计,点接触处橡胶压缩量最大达33.9%,定子橡胶衬套与转子的接触面积减小约47.5%,定子橡胶衬套应力降低33.0%,显著延长了橡胶疲劳寿命;选用短链结构丁腈橡胶和金属离子活化剂等关键配合剂,攻克了低门尼超高硬度橡胶配方技术,研选了超高硬度油基橡胶材料,橡胶邵

氏硬度达到 HA90, 耐油耐水温度为 150 ℃; 开发了基于多元强化复合材料的高耐磨 TC 轴承, 较普通轴承磨损量平均降低 36.3%。应用该螺杆后, 最大扭矩 21.5 kN·m, 使用时间最长达 484 h, 平均 300 h。与常规等壁厚螺杆相比, 在最大效率点处扭矩提高 50.6%, 总效率提高 28.1%; 在任选压差相同点处, 扭矩提高 58.9%, 总效率提高 29.4%。

1.7 高效固井技术

为有效解决超长水平段水平井套管下入困难和水泥环长久密封完整性难以保证等难题, 研发了以非金属纤维弹性材料为基础的抗高交变载荷水泥浆, 形成了高强度漂浮接箍+双漂浮下套管工艺。

1) 抗高交变载荷水泥浆。针对产层压裂段数增多对弹韧性水泥石在交变载荷条件下完整性要求高的情况, 采用有机纤维改性与合理复配的方式自主研制了弹韧剂 Deform, 利用纤维桥接方式阻碍裂缝延展的机理提高水泥石的韧性, 形成了抗高交变载荷水泥浆, 其基本配方为嘉华 G 级水泥+1.5%~2.5% 降滤失剂+0.5%~1.0% 膨胀剂+0.3%~0.5% 分散剂+1.0%~1.5% 增强剂+2.0%~2.5% Deform+水+0~0.13% 缓凝剂+0.13% 消泡剂, 密度 1.45~2.35 kg/L 灵活可调, 弹性模量 5.58 GPa, 交变载荷大于 70 次条件下轴向形变 0.63%、塑性形变 0.39%。该水泥浆在涪陵、宜昌、泸州、红星等地区的 75 口井进行应用, 压裂后环空均不带压, 实现了水平段最长 4 286 m、温度最高 130 ℃、密度最高 2.25 kg/L。涪陵工区应用抗高交变载荷水泥浆后, 环空带压率由 2016 年的 61.1% 降至 2020 年的 8.8%, 解决了储层压裂改造条件下水泥环的长久密封完整性难题。

2) 高强度漂浮接箍+双漂浮下套管工艺。在实钻摩阻系数较高的长水平段水平井采用常规滑动下套管方式时存在螺旋屈曲自锁风险, 难以保证套管顺利下至设计井深, 而漂浮下套管工艺可以解决套管不能顺利下入设计井深的问题。但是, 常规漂浮接箍存在破裂盘承压能力不足、破裂盘打开情况下循环建立不稳定和破裂盘碎屑循环困难的问题, 为此, 自主研发了高强度漂浮接箍, 采用非金属盲板, 承压能力达 70 MPa, 破碎后的粒径小于 8.0 mm, 不影响后续作业, 保证了漂浮下套管工艺的安全实施。同时, 采用双漂浮下套管工艺显著降低套管下入摩阻, 满足实钻摩阻系数较高情况下套管的安全下入。中国石化在 SY9-3HF 井中应用该技术后, 下套管时从 A 靶点至井底无遇阻现象, 悬重波动范围 588.0~705.6 kN, 成功解决了该井 4 035 m 长水平段

套管安全下入的难题。

2 超长水平段水平井钻井存在的问题

“十四五”时期, 我国能源结构持续优化, 为实现 2025 年天然气年产量达到 $2\,300\times 10^8\text{ m}^3$ 以上的目标, 需加快页岩气勘探开发力度, 而超长水平段水平井是提高页岩气产量的重要技术手段。近年来, 中国石化页岩气水平井水平段不断增长, 目前水平段最长为 JY18-S12HF 井的 4 286 m, 但国外最长水平段纪录达到 6 366 m^[19], 国内水平段长度 3 000 m 以上的超长水平段水平井占比远低于国外, 国内页岩气区块地质条件复杂、非均质性强, 在地质选区评价体系、工具装备性能、降摩减阻技术和固井配套体系与工艺方面仍存在诸多挑战与难题。

1) 页岩气超长水平段水平井地质选区与评价体系不完善。超长水平段水平井地质评价主要面临 3 个问题: 一是需要进一步优化目前的地质评价体系, 区别于常规水平井钻井, 超长水平段水平井随着水平段长度延伸, 与之相对应的断缝体系、应力变化、井壁稳定性等不确定性进一步增强, 需要思考如何建立基于系统性思维的评价体系; 二是评价手段单一, 目前的评价手段基本借鉴常规的地质评价工具, 采用分散式单项评价, 多要素定性分析进行综合地质评价, 针对性不强, 各影响因素无法量化, 需要进一步丰富完善评价手段; 三是实验方法及评价工具技术薄弱, 缺乏超长水平段水平井工艺、参数的物模、数模相关软硬件基础设施配套。

2) 关键提速工具的使用寿命和性能存在较大差距。页岩气超长水平段水平井钻井工具与装备主要在以下方面存在差距: a. 国外提速工具的使用寿命长、性能稳定, 螺杆钻具的转速达 1 000 r/min、使用寿命达 1 000 h 以上^[20], 而中国石化目前研制应用的螺杆转速 550 r/min、使用寿命 200~300 h, 与国外的螺杆相比存在较大差距; b. 目前国内的钻头单趟钻进尺最长达 4 225 m, 而国外的钻头单趟钻进尺早已突破 5 000 m^[21]; c. 国外旋转导向工具的造斜率可达到 $(16^\circ\sim 18^\circ)/30\text{ m}$, 而国内旋转导向工具在造斜率、安全可靠等方面仍有较大差距。

3) 降摩减阻技术有待提高。a. 钻井液方面, 与国外油服公司相比, 在相同密度情况下国内油基钻井液普遍存在黏度高、切力较低和流变性能差等问题, 高端油基钻井液处理剂较少, 性能指标存在较大差距; b. 降摩减阻工具方面, 国外以振荡类降摩

减阻工具为主,产品类型丰富、性能稳定,对改善定向控制、提高机械钻速和井眼清洁具有显著效果,目前中国石化研制的水力振荡器在现场应用中虽然取得了较好的降摩减阻效果,但在可靠性、使用寿命等方面还有待提升,需要对工具设计、在钻具组合中的安放位置等方面开展更加深入的研究。

4)下套管工艺与水泥浆配套不足。a.下套管工艺方面,国外页岩气超长水平段水平井中广泛应用漂浮下套管技术,而中国石化仅有1口超长水平段页岩气水平井应用了该技术,漂浮工具在非金属材料承压能力、精准打开结构设计方面存在差距;b.水泥浆方面,国外研发的泡沫水泥浆已广泛用于北美的页岩气超长水平段水平井固井,实现了页岩气井全生命周期环空封固,而国内泡沫水泥浆在页岩气井中的应用尚处于初期阶段。

3 超长水平段水平井钻井发展建议

超长水平段水平井技术是国内外实现页岩气大规模开发降本增效的重要方向,通过加强超长水平段水平井地质评价技术、关键提速工具和装备、超长水平段降摩减阻技术、套管下入与长效封固技术等方面的研究攻关,以经济、安全、高效为原则,逐步形成成熟的页岩气超长水平段水平井高效钻井技术方案,全面提升页岩气超长水平段水平井工程技术水平,为页岩气高效开发提供强有力的技术支撑。

1)加强对超长水平段水平井地质评价技术的研究与攻关,建立相适应的评价体系,丰富评价手段;同时加大相关实验装备与软件配套技术的攻关研发,如长水平段井壁稳定性技术攻关、井震结合动态预控技术、地质工程一体化评价手段等,形成完善的超长水平段水平井地质评价技术体系,精确评价分析超长水平段水平井部署井位。

2)强化关键提速工具研发力度,重点开展工具关键材料和机械结构的研究,开发低成本高造斜率旋转导向系统、高性能螺杆、扭力冲击器、井下动态参数控制工具、切深自调节PDC钻头及智能参数采集PDC钻头等工具,并加快超长水平段水平井钻井装备配套,不断提高工具与装备性能,形成超长水平段水平井关键提速工具和装备产品系列,实现超长水平段水平井超长裸眼段一趟钻完成,大幅缩短钻井周期。

3)加强高效降摩减阻技术研究,基于地层地质、工程要求,开展清洁油基钻井液体系构建,开展

油基钻井液提切剂、高效润滑剂、高性能乳化剂、多尺度封堵剂研选,对钻井液配方进行优化与评价,形成适用于超长水平段水平井的清洁钻井液。同时,对国内外水力振荡器、扭力冲击器和清砂短节等降摩减阻工具进行研选并进行相关的攻关研制,以降低摩阻扭矩为目标函数确定降摩减阻工具最优安放位置,形成最佳的降摩减阻设计方案,提高超长水平段水平井定向钻井效率。

4)加强固井液体体系和下套管工具研究,借鉴国外页岩气超长水平段水平井广泛应用漂浮下套管技术的经验,大力开展高承压破碎式漂浮下套管工具、可精准打开的漂浮下套管工具、高效偏心自旋转引鞋研制,加强高精度套管下入计算软件开发。同时,大力开展固井液及其添加剂的基础理论研究,研发高效冲洗前置液、泡沫水泥浆等高性能固井液体体系,设计适用于超长水平段水平井的多级冲洗工艺,实现页岩气超长水平段水平井全生命周期的高效封固。

4 结束语

经过多年来的技术攻关与实践探索,中国石化页岩气超长水平段水平井钻井技术装备配套、工具和工艺等取得重大进步,实现了关键旋转导向工具的国产化,初步形成了页岩气超长水平段水平井钻井技术,有力支撑了国内页岩气超长水平段水平井的实践探索。但是,国内页岩气区块地质条件复杂、非均质性强,页岩气超长水平段水平井的延伸能力、工具装备的作业效率及关键指标等方面与国外还存在较大的差距。因此,建议在完善现有超长水平段水平井钻井技术的基础上,进一步开展关键技术工艺的攻关研究,推动国内页岩气超长水平段水平井钻井技术发展完善,实现国内页岩气规模效益开发。

参 考 文 献

References

- [1] 孙永兴,贾利春.国内3000 m长水平段水平井钻井实例与认识[J].石油钻采工艺,2020,42(4):393-401.
SUN Yongxing, JIA Lichun. Cases and understandings on the drilling of horizontal well with horizontal section of 3 000 m long in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(4): 393-401.
- [2] 彭兴,周玉仓,龙志平,等.南川地区页岩气水平井优快钻井技术进展及发展建议[J].石油钻探技术,2020,48(5):15-20.
PENG Xing, ZHOU Yucang, LONG Zhiping, et al. Progress and development recommendations for optimized fast drilling technology

- in shale gas horizontal wells in the Nanchuan Area[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(5): 15–20.
- [3] 张家希, 于家庆, GALCHENKO R, 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, GALCHENKO R, et al. North America unconventional long lateral well fast-drilling technology with case study[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(8): 1–11.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 李东杰, 王炎, 魏玉皓, 等. 页岩气钻井技术新进展[J]. *石油科技论坛*, 2017, 36(1): 49–56.
- LI Dongjie, WANG Yan, WEI Yuhao, et al. Latest shale gas drilling technological development[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2017, 36(1): 49–56.
- [7] 杨海平, 游云武. 焦页2-SHF长水平井钻完井关键技术[J]. *钻采工艺*, 2018, 41(3): 5–8.
- YANG Haiping, YOU Yunwu. Critical drilling technology for drilling super-long horizontal Well JY 2-SHF[J]. *Drilling & Production Technology*, 2018, 41(3): 5–8.
- [8] 姜政华, 孙钢, 陈士奎, 等. 南川页岩气田超长水平段水平井钻井关键技术[J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(5): 20–26.
- JIANG Zhenghua, SUN Gang, CHEN Shikui, et al. Key drilling technologies for horizontal wells with ultra-long horizontal sections in Nanchuan Shale Gas Field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(5): 20–26.
- [9] 覃岚, 董国昌, 郭建勋, 等. 基于分段摩阻因数的水平井延伸极限分析及应用[J]. *东北石油大学学报*, 2022, 46(2): 107–116.
- QIN Lan, DONG Guochang, GUO Jianxun, et al. Analysis and application of horizontal well extension limit based on sectional friction factor[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2022, 46(2): 107–116.
- [10] 胡德高, 黄文君, 石小磊, 等. 页岩气水平井延伸极限预测与参数优化[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(17): 7053–7058.
- HU Degao, HUANG Wenjun, SHI Xiaolei, et al. Prediction of extension limit and parameter optimization of shale gas horizontal drilling[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(17): 7053–7058.
- [11] 付强. 四川盆地页岩气超长水平段水平井钻井实践与认识[J]. *钻采工艺*, 2022, 45(4): 9–18.
- FU Qiang. Drilling practice and understanding of ultra-long horizontal section wells of shale gas in Sichuan Basin[J]. *Drilling & Production Technology*, 2022, 45(4): 9–18.
- [12] 周文涛, 肖坤, 董新, 等. 页岩油超长水平井钻井关键技术分析[J]. *石化技术*, 2022, 29(4): 133–134.
- ZHOU Wentao, XIAO Kun, DONG Xin, et al. Analysis of key technologies of shale oil drilling in ultra-long horizontal wells[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2022, 29(4): 133–134.
- [13] 常晓峰, 孙金声, 王清臣. 水平井和斜井井眼清洁技术研究进展及展望[J]. *钻井液与完井液*, 2023, 40(1): 1–19.
- CHANG Xiaofeng, SUN Jinsheng, WANG Qingchen. Hole cleaning technology for horizontal and deviated drilling: progress made and prospect[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2023, 40(1): 1–19.
- [14] 张国荣, 王俊方, 张龙富, 等. 南川常压页岩气田高效开发关键技术进展[J]. *油气藏评价与开发*, 2021, 11(3): 365–376.
- ZHANG Guorong, WANG Junfang, ZHANG Longfu, et al. Key technical progress in efficient development of Nanchuan normal-pressure shale gas field[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(3): 365–376.
- [15] 刘军波, 韦红术, 赵景芳, 等. 考虑钻头转速影响的新三维钻速方程[J]. *石油钻探技术*, 2015, 43(1): 52–57.
- LIU Junbo, WEI Hongshu, ZHAO Jingfang, et al. A new 3D ROP equation considering the rotary speed of bit[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(1): 52–57.
- [16] 李谦, 曹彦伟, 朱海燕. 基于人工智能的钻速预测模型数据有效性下限分析[J]. *钻探工程*, 2021, 48(3): 21–30.
- LI Qian, CAO Yanwei, ZHU Haiyan. Discussion on the lower limit of data validity for ROP prediction based on artificial intelligence[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(3): 21–30.
- [17] 刘忠, 胡伟, 尹卓, 等. PDC钻头混合布齿参数对破岩的影响研究[J]. *石油机械*, 2020, 48(3): 51–57.
- LIU Zhong, HU Wei, YIN Zhuo, et al. The influence of mixed cutter arrangement parameters of PDC bit on rock breaking[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(3): 51–57.
- [18] 邹德永, 徐城凯, 易杨, 等. PDC钻头布齿参数与地层适应性的试验研究[J]. *天然气工业*, 2017, 37(9): 85–90.
- ZOU Deyong, XU Chengkai, YI Yang, et al. An experimental study on PDC bits' cutter parameters and formation adaptability[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(9): 85–90.
- [19] 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.
- [20] 刘克强. “一趟钻”关键工具技术现状及发展展望[J]. *石油机械*, 2019, 47(11): 13–18.
- LIU Keqiang. Technology status and development prospect of the key tools of one-trip drilling[J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 47(11): 13–18.
- [21] 杨金华, 郭晓霞. PDC钻头技术发展现状与展望[J]. *石油科技论坛*, 2018, 37(1): 33–38.
- YANG Jinhua, GUO Xiaoxia. The present status and outlook of PDC bit technology[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2018, 37(1): 33–38.