

文章编号: 0253-2697(2023)12-2297-11 DOI:10.7623/syxb202312018

中美页岩油气储层改造技术进展及发展方向

翁定为^{1,2} 雷 群^{1,2} 管保山¹ 何春明^{1,2} 孙 强^{1,2} 黄 瑞^{1,2}

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 中国石油天然气集团有限公司油气藏改造重点实验室 河北廊坊 065007)

摘要:页岩油气资源作为国内外非常规油气资源勘探开发的热门领域,需要通过压裂改造才能获得工业开采价值。结合页岩储层物性特征和流体渗流规律,系统总结了美国页岩油气储层改造在裂缝控藏认识、压裂监测技术、重复压裂技术、数据平台建设和矿场实验室建设 5 个方面的技术进展以及中国页岩油气储层改造取得的缝控压裂优化技术、新型压裂配套装备、分段压裂核心工具、低成本压裂材料、水力裂缝监测技术、井筒重构压裂技术和压裂优化设计软件 7 项关键技术,全面剖析了中国页岩油气储层改造在甜点有效甄别、压裂参数优化、储量立体动用和剩余储量挖潜 4 个方面面临的技术挑战。在此基础上,为有效提高压裂缝网对页岩油气资源的动用程度,实现页岩储层的大规模建产与高效益开发,提出了 4 个方面的发展建议:①加强基础研究,筑牢页岩油气规模发展基石;②完善技术配套,构建有中国特色压裂技术体系;③提高储量动用率,构建全生命周期技术体系;④推进数字化转型,构建物联网智能发展格局。

关键词:页岩油气;储层改造;缝控压裂技术;储量动用;全生命周期;数字化

中图分类号:TE35

文献标识码:A

Progress and development directions of reservoir stimulation techniques for shale oil and gas in China and the United States

Weng Dingwei^{1,2} Lei Qun^{1,2} Guan Baoshan¹ He Chunming^{1,2} Sun Qiang^{1,2} Huang Rui^{1,2}

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;

2. CNPC Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Stimulation, Hebei Langfang 065007, China)

Abstract: Shale oil and gas resources currently spurt into popularity worldwide in the field of unconventional oil and gas exploration and development, of which industrial production can be effectively achieved by hydraulic fracturing. Based on the physical characteristics of shale reservoirs and the rheological properties of fracturing fluids, the technological progress, in stimulating shale oil and gas reservoirs in the United States, is systematically summarized, involving the understanding of fracture-controlled reservoirs, hydraulic fracturing monitoring technology, refracturing technique, data platform construction, and field-test site establishment. Additionally, seven key technologies were achieved during shale reservoir stimulation in China, including fracture-controlled stimulation techniques, innovative matched hydraulic fracturing equipment, core tools for multi-stage hydraulic fracturing, low-cost hydraulic fracturing materials, hydraulic fracture monitoring technology, wellbore reconstruction hydraulic fracturing technology, and fracturing optimization design software. Technical challenges faced by shale oil and gas reservoir stimulation are comprehensively analyzed in four areas: effective identification of sweet spots, optimization of hydraulic fracturing parameters, three-dimensional recovery of reserves, and potential exploitation of remaining reserves. On this basis, in order to effectively improve the development of shale oil and gas resources by fracture networks and realize large-scale production and cost-effective development of shale reservoirs, four development suggestions are put forward: (1) strengthen basic research to lay a solid foundation for the large-scale development of shale oil and gas; (2) enhance technological support to build a Chinese special hydraulic fracturing technology system; (3) increase reserve recovery rates and establish a full-life-cycle technology system; (4) promote digital transformation and establish an intelligent development pattern of the Internet of Things.

Key words: shale oil and gas; reservoir stimulation; fracture-controlled stimulation technology; reserve recovery; full life cycle; digitalization

引用:翁定为,雷群,管保山,何春明,孙强,黄瑞.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.

Cite: WENG Dingwei, LEI Qun, GUAN Baoshan, HE Chunming, SUN Qiang, HUANG Rui. 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.

基金项目:中国石油天然气集团有限公司基础性前瞻性项目“储层改造关键技术与装备”(2021DJ45)资助。

第一作者:翁定为,男,1981年6月生,2013年获中国石油勘探开发研究院博士学位,现为中国石油勘探开发研究院压裂酸化技术中心主任、教授级高级工程师,主要从事压裂工艺技术方面的研究。Email:wendw69@petrochina.com.cn

通信作者:雷 群,男,1963年8月生,2003年获石油大学(北京)博士学位,现为中国石油勘探开发研究院副院长、教授级高级工程师,主要从事采油采气工程技术方面的研究工作。Email:leiqun@petrochina.com.cn

近年来,随着基础理论和工艺技术的成熟与完善,页岩油气资源已逐步成为国内外非常规油气资源勘探开发的热门领域^[1-2]。自2000年以来,北美地区水平井钻井和多段压裂技术相继取得突破,实现了非常规油气储层的效益开发,进而引发了页岩油气革命,影响了世界能源格局。据统计,2021年美国页岩油产量为 3.62×10^8 t,页岩气产量为 7643×10^8 m³^[3]。借鉴美国页岩油气革命的成功经验,中国不断发展水平井体积改造技术,在“十三五”(2016—2020年)期间先后建成了胜利济阳、吉木萨尔和古龙3个页岩油国家级示范区以及涪陵、长宁—威远和昭通3个页岩气国家级示范区^[4-5],并取得了页岩油气资源的规模建产和效益开发。根据2022年全国能源工作会议公布的数据^[6],2021年页岩油产量达到 240×10^4 t,页岩气年产量达到 230×10^8 m³。因此,页岩油气资源已逐步接替常规油气资源成为国内外油气能源行业稳步发展的重要保障^[7]。

与常规储层相比,由于页岩储层物性条件较差,因此油气渗流规律复杂,导致开采难度较大,而水平井分段压裂技术的大规模应用为页岩油气产量的稳步增长提供了重要支撑^[8]。美国围绕“储量全动用”目标,通过大幅提高水平井单段射孔簇数量(10簇以上,最高达到16~20簇),并辅助采用暂堵转向措施(暂堵球与多粒径颗粒组合),实现了页岩油气储层的低成本、高效率改造^[9-10]。中国自2006年启动水平井压裂改造重大攻关项目,水平井分段压裂技术迅速发展,形成了“长水平段完井+多簇射孔+滑溜水携砂+分段压裂”的改造技术体系,为页岩油气的高效开发提供了有力支撑。截至2021年,中国石油页岩油气完钻水平井总数达到2180口,其中页岩油井为850口,页岩气井为1330口^[11]。因此,水平井分段压裂技术成为了国内外页岩油气资源储量动用和增产挖潜的主体技术。近年来,国内外水平井分段压裂技术不断向“缝控”储量动用、施工参数优化、裂缝动态诊断、数据平台建设等方面深入发展^[11-14]。

笔者结合页岩储层物性特征和流体渗流规律,总结了美国页岩油气储层改造5个方面的技术进展,以及中国页岩油气储层改造的7项关键技术,剖析了中国页岩油气储层改造面临的4个方面的技术挑战并提出了4项发展建议。

1 美国页岩油气储层改造技术进展

近年来,通过基础理论和现场应用的有机结合,美国页岩油气储层改造技术发展迅速,并不断在裂缝控藏认识、压裂监测技术、重复压裂技术、数据平台建设和矿场实验室建设5个方面深入发展^[15-16]。

1.1 裂缝控藏认识不断深化

在“缝控”储量动用方面,美国先后在Permian、Eagle Ford、Bakken等盆地开展现场试验,研究了水力/支撑裂缝扩展长度、压裂液横向波及范围、支撑剂纵横向运移范围、井间连通性、孔簇开启效率等因素对裂缝控藏能力的影响规律,为明确远场水力裂缝复杂程度和支撑剂铺置状态、促进井筒多簇射孔裂缝均匀起裂、合理部署立体开发井网提供理论指导^[17]。

针对水平井分段多簇压裂裂缝非均匀扩展问题,美国持续完善升级套管滑套技术,发展连续油管拖动、可溶球座、射频识别等技术,逐步解决滑套打开/关闭、施工排量受限等问题,目前已满足超长水平井(2000 m以上)高效改造需求^[17]。如NCS公司研制了Innovus™连续油管拖动开关滑套,已成功应用16379口井,累积应用284037支,其中单井最高应用260支,打开/关闭成功率可达99.5%。此外,通过在滑套上安装光纤、传感器等仪器,可实现井下实时监测,促进储层改造与生产智能相融合。如哈里伯顿公司研制了集成示踪剂和传感器的新型滑套,示踪剂的井下有效期可达5 a;Steelhaus公司研制的DAS/DTS无限级压裂滑套,可实时反馈井下动态数据^[18]。

1.2 压裂监测技术持续发展

在裂缝动态诊断方面,美国不断发展了微地震、光纤和鹰眼等技术,实现了簇级裂缝形态的监测与刻画^[19-20],不同程度地解决了3方面的问题。①完全解决:采用“高精度分布式光纤+鹰眼+示踪剂”监测技术,解决了井筒内压裂液及支撑剂在簇间动态分配的问题,明确了水平井分段多簇压裂单簇开启效率及其产量贡献,可指导压裂参数优化。②部分解决:采用“微地震+邻井光纤+密闭井筒压力+示踪剂”监测技术,解决了远场动态裂缝扩展尺度的定量描述问题,初步明确了非均匀扩展裂缝的动态缝长,为井网布置提供依据。③局部揭示:通过大斜度井取心可显示出水力裂缝复杂特征及其支撑剂铺置状态,但无法实现支撑裂缝全局尺度的精细刻画。

此外,美国近期发展了高分辨率声学成像技术,可通过固态声波成像探头、专有软件固件和机载遥测系统,捕捉和存储亚毫米级三维点云数据,形成井筒高分辨率成像,从而有效提高近井裂缝的监测质量。该技术可在井筒内实现360°完整扫描,分辨率高达0.125 mm,且成像与流体类型无关,在水、钻井泥浆和生产流体中均可应用。

1.3 重复压裂技术逐渐成熟

在延长页岩油气生产井生命周期方面,针对初次水力压裂缝间距较大、施工规模较小或采用裸眼完井

的水平井,美国持续开展重复压裂技术的基础研究和现场应用。美国早期普遍采用多级暂堵理念,已经形成并完善了不同系列的暂堵材料,可有效满足孔眼暂堵、缝内暂堵、缝端暂堵等多种施工模式的需求。自 2017 年以后,井筒重构技术逐渐发展成为水平井重复压裂的主体技术,主要采用尾管固井或膨胀管补贴以实现低产低效井的井筒重构,如在 $\Phi 11.43\text{ cm}(4\frac{1}{2}\text{ in})$ 或 $\Phi 13.97\text{ cm}(5\frac{1}{2}\text{ in})$ 套管中下入 $\Phi 8.89\text{ cm}(3\frac{1}{2}\text{ in})$ 、 $\Phi 10.16\text{ cm}(4\text{ in})$ 、 $\Phi 11.43\text{ cm}(4\frac{1}{2}\text{ in})$ 尾管固井或采用膨胀管补贴进行井筒重构($5\frac{1}{2}\text{ in}$ 套管修复后通径为 106 mm),从而有效延长页岩油气水平井的生命周期^[18,20]。美国在 Bakken、Barnett 和 Eagle Ford 等区块开展了水平井多级暂堵和井筒重构 2 类重复压裂技术的现场试验,结果表明,水平井经重复压裂施工后产量增加了 $32\% \sim 174\%$,且在同一区块内井间产量增幅差异较大。此外,井筒重构重复压裂技术的净现值约为多级暂堵重复压裂技术的 2 倍^[18]。

1.4 数据平台建设持续推进

在地质工程一体化数据平台建设方面,随着高性能计算领域的不断突破,美国在“统一数据平台、自动辅助分析、数据预处理与计算能力优化”等方面取得了重要进展,可助力复杂地质力学问题的精细描述与高效分析^[17,21]。具体包括:①统一数据平台。地质、油藏、工程、数据科学等多学科研究人员共享最新数据与专业软件,建立非线性 workflow,便于地质模型在不同专业不同工作流程之间的迭代矫正,如斯伦贝谢公司开发的 OSDU 数据平台,可较为准确地解决复杂地质力学问题。②自动辅助分析。协助用户快速完成输入参数的不确定性解释,并进行批量建模与模拟,从而得到更加客观的模拟分析结果,以 CMG 软件为例,综合统计分析、机器学习等人工智能技术开展不确定性建模与计算,可有效确定最佳方案。③精简数据预处理流程。通过数据标准化减轻或消除测试仪器和环境等因素对数据质量的影响,提升数据的预处理效率。④计算能力提升优化。加大高性能计算基础设施、云计算、人工智能资源方面的投资,如 CMG 软件在应用人工智能技术提速前后,采用 SPE10 标准算例进行对比,常规方法 4 核计算用时 139.5 min ,而人工智能+并行用时仅为 14.9 min ,提速约 9 倍^[17]。

1.5 矿场实验室建设成为焦点

在室内研究与现场应用有机结合方面,矿场实验室建设成为美国页岩油气开发技术政策定型、储层改造技术升级换代的重要抓手。美国矿场实验室建设以聚焦主要矛盾、总体设计、分批推进为原则,根据阶段性核心目标和关键技术开展部署,形成可复制的开发技术模

式。以二叠盆地为例,水力压裂试验基地(HFTS)是水力压裂监测研究项目^[22],HFTS-1(2014—2018年)采用大斜度井取心技术主要解决远场水力裂缝复杂程度和支撑剂铺置规律的认识问题;HFTS-2(2018—2022年)采用“分布式光纤+鹰眼+示踪剂”监测技术主要解决井筒内多簇裂缝均匀起裂和扩展问题;HFTS-3(2023—2025年)基于前期水力裂缝的研究成果主要解决立体开发井网部署与提采问题。

此外,美国矿场实验室建设立足于“3个融合”,通过精细设计、协同实施、综合评估,形成了室内—现场—室内的技术迭代模式。具体包括:①数据融合。实现室内实验数据、地质评估数据、现场施工数据、实时监测与后评估数据、生产数据的相互融合与及时共享。②技术融合。推进地质建模、地质力学建模、油藏模拟、压裂建模、监测技术、高保真取心技术的有效融合。③人员融合。保障多学科团队成员具备明确的研究目标和统一的项目计划,并遵循清晰的任务分配和严格的时间管理。

2 中国页岩油气储层改造关键技术

借鉴美国页岩油气革命的成功经验,中国通过强化室内基础研究和现场示范应用,页岩油气储层改造在缝控压裂优化技术、新型压裂配套装备、分段压裂核心工具、低成本压裂材料、水力裂缝监测技术、井筒重构压裂技术和压裂优化设计软件 7 个方面取得了重要进展。

2.1 缝控压裂优化技术

近年来,针对中国页岩油气储层特性,在非常规储层水平井体积压裂理念的基础上发展了“密切割+变黏滑溜水+多粒径支撑剂+多级暂堵”的缝控压裂优化技术^[8,14,16]。缝控压裂技术是指将水力裂缝的缝长、缝高和缝间距等几何参数,与页岩储层的物性、地应力场和井控储量等地质参数结合起来,并进行优化以实现油气储量的最大化动用(图 1)。其内涵是以裂缝控藏为目的,基于 4 类关系,即“应力场与裂缝扩展的关系(优化裂缝形态)、渗流场与裂缝密度的关系(优化裂缝参数)、压力场与流固耦合之间的关系(优化裂缝导流)、速度场与井网缝网的关系(优化布井与生产)”,提出相应的优化方式,从而扩大缝控规模,实现油气资源的效益开发^[23-24]。

目前缝控压裂技术已成功应用于中国典型页岩油气储层:①针对陆相页岩油类型多样、流度低、非均质性强、压力系数低等特征,形成了以“密切割+变黏滑溜水携砂+多粒径组合+补能驱油”为核心的缝控压裂技术,已累计应用 420 口井,簇间距缩短至 $6 \sim 10\text{ m}$,

加砂强度提高到 4 t/m, 压后产量增加 20% 以上, 推动了鄂尔多斯、准噶尔等盆地页岩油产量的持续增长。②针对川南海相页岩气储层致密、裂缝发育、两向应力差大等特征, 形成了以“小簇距布缝+段内多簇+低黏滑溜水造复杂缝+小粒径石英砂缝网支撑”的缝控压裂技术, 已累计应用 650 口井, 井均测试产量提高 27.9%, 井均的估计最终采收率(EUR)提升 15.8%, 显著提高了长宁—威远、昭通 2 个国家示范区的开发效果。因此, 缝控压裂技术有望成为页岩等非常规储层增产挖潜和效益开发的主体技术^[25-27]。

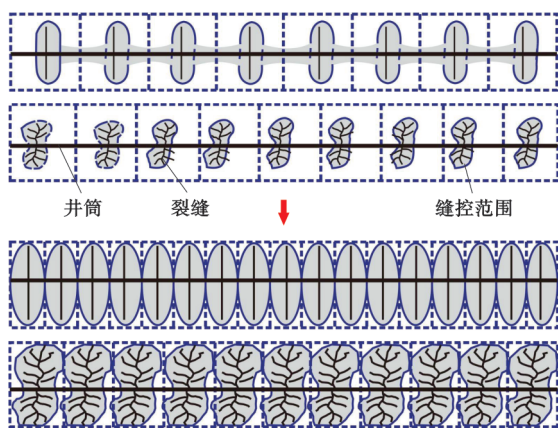


图 1 缝控储量最大化优化设计示意

Fig. 1 Diagram of most optimized design of fracture-controlling reserves

2.2 新型压裂配套装备

中国已成功研制了 2500 型—3000 型柴驱压裂装备和 5000 型—7000 型电驱压裂装备, 以及 8000 m 连续油管及作业装备, 其中, 电驱压裂装备已逐步取代柴驱压裂装备而成为现场应用的主流^[28-30]。具体包括: ①电驱压裂机组实现规模化应用, 2021 年建成电驱压裂作业平台 110 个, 其中, 自主研发的 7000 型电驱压裂作业平台 5 个, 单车排量可达 $2 \text{ m}^3/\text{min}$, 最高工作压力达到 140 MPa, 不锈钢阀箱寿命超过 800 h, 电驱混砂车最大可达 31.8 m^3 ; 2022 年电驱压裂装备总能力达到 $8.5 \times 10^5 \text{ kW}$, 比 2021 年增加 $1.9 \times 10^5 \text{ kW}$, 占总能力的 28.8%; ②连续管作业能力不断突破, 最大作业深度超过 8000 m, 水平段最大作业长度为 3931 m (苏里格气田桃 2-6-30H1 井)。耐高压快速插拔井口作业效率显著提高, 耐压可达 105 MPa, 通径为 120/130 mm, 井口切换时间由 45~60 min 减少到 8~12 min^[31]。

2.3 分段压裂核心工具

中国已成功研制了可溶桥塞、可溶球座、模块化多簇射孔器、趾端滑套等压裂工具, 可替代进口产品, 促使施工成本大幅降低, 有利于支撑页岩油气储层的高效改造^[32]。具体包括: ①可溶桥塞性能持续提升。研

发了适用井温为 20~180 °C 的全金属桥塞, 溶解时间可控制在 5~12 d 内。2021 年页岩油气储层压裂了 572 口水平井, 其中可溶桥塞应用占比为 91%。②可溶球座规模化应用。长庆油田已大规模应用了 1 391 口井 13 264 段, 其中, 华 H90-3 井压裂 68 段, 在 28 h 内成功清理 24 个可溶球座。③长水平段多簇射孔工具实现提速。模块化分簇射孔器的多簇点火能力由 14 簇提高至 20 簇, 配合插拔式井口装置, 平均更换时间为 24 min, 作业提速约 54.6%, 并成功应用于深层页岩气井黄 203 井 (水平段长 2 150 m)。

2.4 低成本压裂材料

针对页岩油气大规模改造的降本需求, 中国持续推进低成本低浓度滑溜水的研发与应用, 推广石英砂规模化应用, 且技术和经济示范效果显著^[33]。①低成本材料规模化应用: 截至 2022 年 10 月, 水平井压裂井数为 1 497 口, 压裂液用量为 $3 154 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其中, 页岩油气井用量为 $1 048 \times 10^4 \text{ m}^3$, 滑溜水占比达 85%; 支撑剂用量为 $482 \times 10^4 \text{ t}$, 其中, 页岩油气井用量为 $128 \times 10^4 \text{ t}$, 石英砂占比达 79%。②“低浓度、可重复、可变黏”滑溜水研发成功: 通过简化配方, 压裂液体系由胍胶体系 (150~250 元/ m^3) 发展到复合体系 (滑溜水+胍胶) (100~200 元/ m^3), 再到滑溜水体系 (30~80 元/ m^3), 最后到变黏滑溜水 (50~100 元/ m^3), 成本不断降低, 且降阻率提高至 71%。③石英砂规模化应用: 基于“无因次导流能力”理念大规模应用石英砂, 其中 3 500 m 以浅页岩气石英砂应用比例由 34% 提高到 72%, 3 500 m 以深页岩气石英砂应用比例提高到 47%, 页岩油石英砂应用比例几乎达到 100%。

2.5 水力裂缝监测技术

针对水平井压后效果评价难度大的问题, 中国加大裂缝监测技术攻关力度, 创新发展了 4 项技术^[34]。①分布式光纤监测技术: 可实现井下光信号特征变化探测和井下温度和声波信号定位, 反映每簇进液情况, 光纤最高耐温可达 300 °C, 耐压为 100 MPa, 下入深度为 3 000 m。2022 年在大庆、长庆和新疆等油田应用 10 余口井, 其中 GY3Q6H2 井成功监测 44 段, 可解释多簇裂缝开启效率和改造均匀程度。②鹰眼监测技术: 采用井下电视成像技术直接观察孔眼形态, 可定量描述各射孔簇的改造程度, 评价暂堵效果, 耐温可达 125 °C, 耐压为 100 MPa, 在新疆油田等已应用 8 口井, 其中 JLHW219 井成功监测 18 段, 初步实现起裂均匀性和磨蚀程度定量分析。③广域电磁法监测技术: 通过监测压裂前后储层电导率差异来解释裂缝参数, 可获得裂缝方位和长度。④裂缝形态测斜仪表征技术: 通过监测裂缝诱发的地层变形反演裂缝参数, 实现对裂缝形态的

定量表征(垂直裂缝与水平裂缝体积占比),其中,浙江油田 YS112H4、YS112H5 平台平均垂直裂缝体积分数为 55%~73%,裂缝复杂指数为 0.53~0.79。

2.6 井筒重构压裂技术

为恢复老油田早期低产低效井的导流能力,中国提出并发展了小套固井、膨胀管补贴和化学封堵井筒重构技术^[35-37]。

2.6.1 小套固井井筒重构技术及配套工艺

针对小套固井井筒重构存在的大裂缝降漏、窄间隙环空封固等难题,突破了 4 项关键技术,实现了 $\Phi 13.97\text{ cm}$ ($5\frac{1}{2}\text{ in}$) 套管下入 $\Phi 10.16\text{ cm}$ (4 in) 或 $\Phi 11.43\text{ cm}$ ($4\frac{1}{2}\text{ in}$) 无接箍套管二次固井(图 2),最大

下入长度为 1500 m,重构井筒承压为 60 MPa,施工排量可达 $10\text{ m}^3/\text{min}$ 。具体包括:①大尺度多裂缝复合凝胶降漏技术。研发了高强度降漏材料,优化强弱凝胶配比和注入量,可实现多条水力裂缝一次性成功降漏。②复杂井况尾管悬挂小套入井技术。通过分析下入条件,配套加重杆和减阻剂以确保下入顺利,并研制了可回接悬挂器及插入工具。③窄间隙高强度树脂环空封固技术。研发了低成本树脂固井材料,其抗压强度可达 65 MPa,在封固后第一、二界面胶结中等及良好率可达 85% 以上。④双层套管桥射联作高效压裂技术。配套小套专用可溶桥塞,承压为 70 MPa;配套超深穿透射孔弹,可提升射孔穿透深。

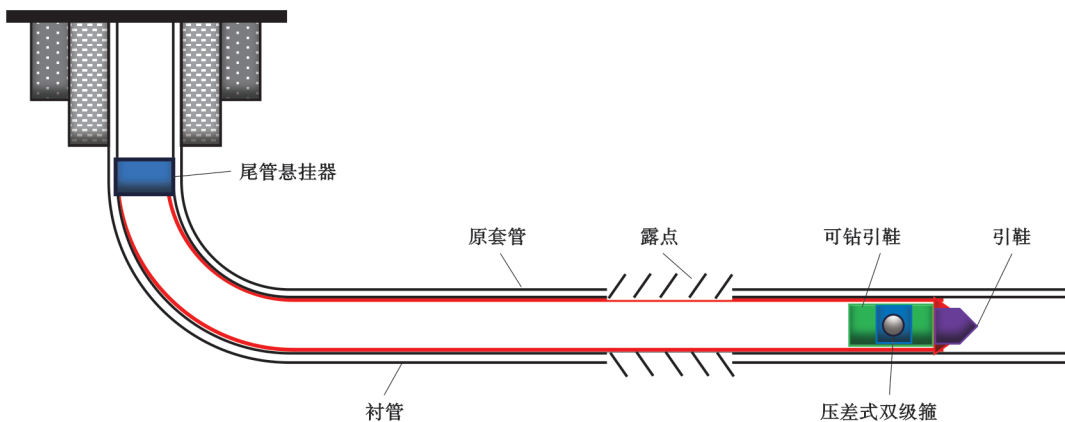


图 2 小套固井工艺示意

Fig. 2 Diagram of small casing cementing technology

2.6.2 膨胀管补贴和化学封堵井筒重构技术

(1) 膨胀管井筒重构技术。形成了“井筒综合检测 + 精准补贴方案设计 + 分段补贴”的低成本膨胀管井筒重构技术,单段补贴长度为 10~30 m,重构井段内通径为 105 mm,承压为 60 MPa,适用井温为 150℃;研制了高强度耐腐蚀膨胀管材和“氢化丁腈 + 耐磨纤维”、“变过盈量”设计思路的管外密封件,可满足 1500 m 水平段下入耐磨要求。

(2) 化学封堵井筒重构技术。形成了“强弱凝胶降低地层漏失 + 树脂水泥填充架桥 + 高强树脂封口”的化学封固井筒重构技术,可无内径损失恢复 $\Phi 13.97\text{ cm}$ ($5\frac{1}{2}\text{ in}$) 井筒完整性,且承压可达 30 MPa。

2.7 压裂优化设计软件

2022 年中国石油勘探开发研究院自主研发了 FrSmart 1.0 Beta(单井版)压裂软件,包含地质力学建模、压裂裂缝模拟、压后产能测试、方案经济评价、现场实施决策和数据信息管理 6 大核心模块(图 3),以及非平面三维裂缝模拟和嵌入式离散裂缝压后产能模拟 2 项特色技术,可基本满足直井和水平井压裂优化设计需求,实现了中国地质工程一体化压裂软件由“0”到“1”的突破,有力打

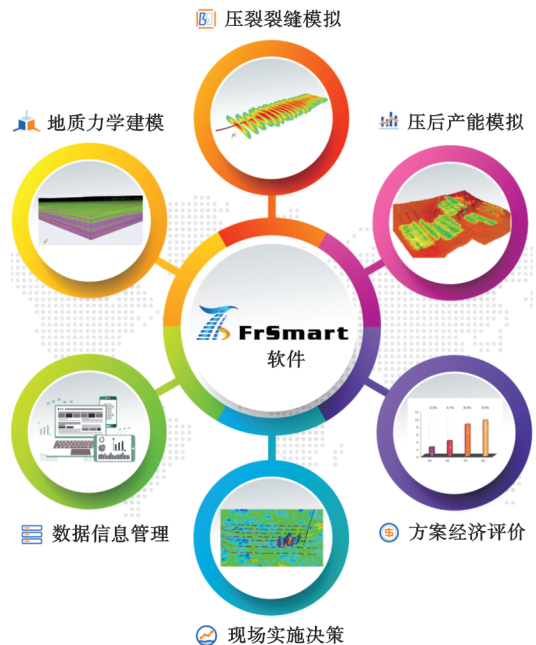


图 3 FrSmart 压裂软件的核心模块

Fig. 3 Core modules of fracturing software FrSmart

破了其他国家的压裂软件(如 Stimplan、GOHFER、Kinetix 等)的长期垄断。目前,FrSmart 压裂软件的

装机量为1084套,已在各油田及钻探企业示范应用超300井次。

3 页岩油气储层改造面临的挑战

虽然中国页岩油气储层改造技术已取得较为有效的进展,但由于页岩储层与常规储层在物性特征、地质甜点、矿物组分和敏感性参数,以及油气赋存状态和流动性质等方面存在显著差异,因此页岩油气储层改造仍面临着甜点有效甄别、压裂参数优化、储量立体动用和剩余储量挖潜4个方面的技术挑战。

3.1 页岩储层物性较差,甜点有效甄别面临挑战

在沉积作用和成岩作用影响下,页岩储层具有致密低孔、平面非均质性强和纵向多层叠置等特征,导致地质甜点通常表现为空间上的非连续展布。而地质甜点的空间展布影响着页岩储层品质和水平井钻完井质量,其中地质甜点的纵向展布决定了储层有效厚度和水平井靶深,而地质甜点的平面展布决定了水平井布缝位置与产量贡献^[37]。因此,地质甜点的有效甄别成为了页岩油气资源高效开发的关键^[38]。此外,基于测井资料解释、地质甜点展布、完井靶体属性和应力分布规律,从有机碳含量、含气性与脆性指数、黏土矿物类型和天然裂缝等相关指标优选储层工程甜点,可为射孔段选择、压裂方案优化提供理论支撑^[39-40]。

鄂尔多斯盆地延长组7段页岩油I+II类储层段长占比为85.2%,其油气产量占比为96.4%,而III类储层段长占比为14.8%,其油气产量占比仅为3.6%,说明了储层性质严重影响油气产量,优选高品质层段有利于实现降本增效的目的(表2)。西南油气田页岩气裂缝监测表明,在纵向支撑缝高仅6~7m的条件下,水平井井眼轨迹偏移甜点位置5~10m,测试产量便降低50%以上,因此对“三维甜点”的甄别技术还需不断向精准化发展。在纵向甜点段识别方面,亟需建立综合含气性、TOC含量、孔隙度、脆性矿物、地应力、裂缝发育程度的页岩储层品质评价方法,为纵向箱体优化提供指导;在水平段甜点评价方面,需要考虑岩性、物性、含油气性和可压性特征,结合井眼轨迹与砂体配置关系实现对甜点的定量评价^[41]。

表2 陇东地区延长组7段页岩油储层品质(RQ)评价标准

Table 2 RQ evaluation criteria for Member 7 of Yanchang Formation shale oil in Longdong area

储层级别	录井显示	气测全烃/ %	自然伽马/ %	声波时差/ ($\mu\text{s}/\text{m}$)	密度/ (g/cm^3)	深电阻率/ ($\Omega\cdot\text{m}$)	黏土矿物含量/ %	总孔隙度/ %	有效孔隙度/ %	渗透率/ mD
I类储层	油斑、油迹	>1.5	<95	>210	<2.54	55~90	<25	>8	>5	>0.07
II类储层	油斑、油迹	>1.0	<105	200~210	2.54~2.58	50~90	<35	6~8	3~5	0.03~0.07
III类储层	油迹、荧光	<1.0	>120	<200	>2.58	35~90	<45	<6	<3	<0.03

3.2 流体渗流规律复杂,压裂参数优化面临挑战

页岩颗粒极其细微,平均粒径仅为 $3.9\mu\text{m}$ ^[42],多颗粒间孔隙内表面具有大量的吸附点位,因此表面吸附成为页岩油气的主要赋存状态^[43]。在水力压裂过程中,由于页岩的强亲水特性使得孔隙-裂缝系统优先发生液-固界面吸附以置换气-固界面吸附,从而加速页岩油气的解吸过程,提高油气资源的采出程度(图4)。因此,表面吸附成为页岩油气增产上产的重要潜力因素,在明确页岩油气的吸附-解吸机理的基础上,可以通过发挥气-液-液三相界面的相互作用来提高油气资源的采出程度^[44]。

对于页岩油而言,考虑非线性渗流及压裂液置换作用,延长组7段页岩油缝间距由40m缩短至5m后,3年累积产油量增幅可达230%(图5),说明了缝间距优化是提高油气动用程度的有效途径^[45]。为降低油气流动阻力和提高孔隙-裂缝系统的导流能力,水力压裂技术需要把握3个要素:

(1) 缝网结构。由于页岩物性差、渗透率低,为缩短油气运移距离,降低油气流动阻力,开发理念需要由传统井网结构向缝网结构转变。

(2) 井型。为扩大油气泄流面积,相对于直井来说,水平井由于横向波及范围较广的优势成为首选。

(3) 水力裂缝。裂缝形态和布缝密度直接影响到油气储量的控制程度^[46],因此优化缝长、缝宽、缝高以及缝间距成为促进页岩油气增产的有效途径。

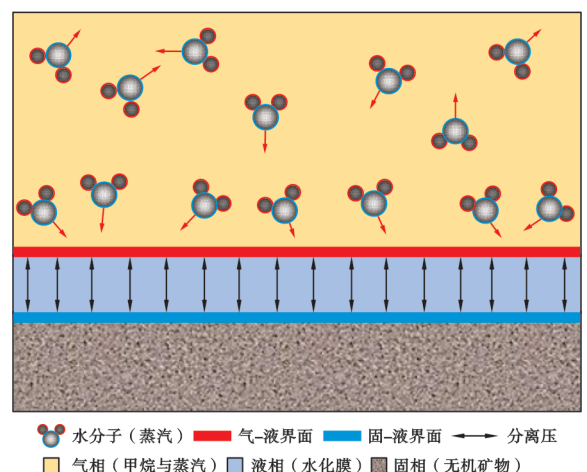


图4 气-液-固界面吸附示意

Fig. 4 Diagram of adsorption at gas-liquid-solid interface

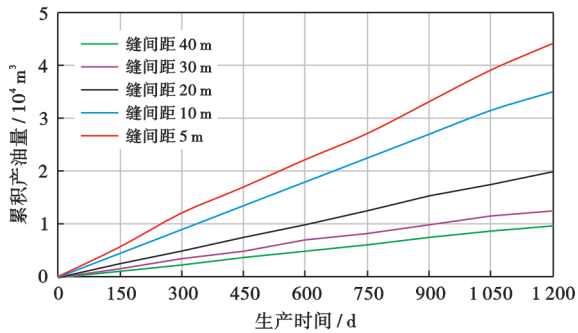


图 5 延长组 7 段页岩油不同缝间距下产量对比

Fig. 5 Comparison of production of Member 7 of Yanchang Formation shale oil under different fracture spacing

目前已成功探索出了“密切割”模式的水平井“缝控压裂”技术,可通过优化水力裂缝参数实现储层波及面积和油气动用程度的合理化控制。

3.3 储层纵向多层叠置,储量立体动用面临挑战

页岩油气储层在纵向上普遍呈多层叠置分布,为解决单层开发资源动用程度低的问题,美国提出水平井立体开发模式,可以实现多层的高效动用。该模式基于储层纵向剖面上各小层的物性参数、砂体展布以及应力状态等特征,通过合理划分开发层系、优选地质甜点和工程甜点,并采用多层立体交错布井和交错布缝方式实现页岩油气资源在纵向上的“全波及”,使得油气储量的动用程度实现最大化^[47-48]。立体开发的核心技术包括:①钻井提速,能够大幅度降低建井周期和费用,为立体开发提供保障;②一次布井到位,能够充分发挥各小层潜力,实现效益最大化,是立体开发的关键。

为实现页岩油气多层立体开发,中国已经探索出“多层系、立体式、大井丛、工厂化”的开发道路^[49],其特点是通过规模化生产,在降低施工成本的同时提高工作效率。立体式和工厂化作业的前提是水平井钻完井技术与水力压裂技术的成熟应用。其中页岩油气钻完井工厂化作业的产品是规模化排布的油气井,压裂工厂化作业能够得到交错分布的人工裂缝网络,从而实现油气资源的高效动用^[50]。此外,压裂工厂化作业以同步压裂为出发点,发展双机组拉链式压裂模式,使得作业效率提高 40%,平台施工时间降低 30%,燃料成本降低 20%。

3.4 早期改造矛盾突出,剩余储量挖潜面临挑战

对于页岩油气储层来说,压裂改造的目的是获得具有较高导流能力的水力裂缝,从而提高地层流体—水力裂缝—井筒系统的流动规模,降低地层流体的采出难度。但由于油气开采过程层间、层内和平面矛盾日益严峻,导致储层压裂改造效果不佳,水力裂缝控藏能力受限,即水力裂缝间仍存在部分储量未得到有效动

用,最终造成页岩油储层具有稳产周期较短、采出程度较低的特点^[8,14]。因此重复压裂成为了有效实现剩余储量的增产挖潜、延长页岩水平井生命周期的有效手段^[16]。

为有效保障页岩油储层重复压裂的效果,实现初次水力裂缝间剩余储量的最大化动用,需要攻克 3 个方面的挑战,即初次水力裂缝间剩余油分布规律的精准表征、重复压裂前地应力场演化规律的精细刻画以及重复压裂水力裂缝扩展形态的精密控制。其中,初次水力裂缝间剩余油分布规律的精密表征是优选重复压裂目标层段和重复压裂施工方式的前提,重复压裂前地应力场演化规律的定量表征是明确重复压裂最佳施工时机和合理布缝密度的核心,重复压裂水力裂缝扩展形态的精密控制是规避井间及缝间干扰和保证裂缝控藏能力的关键。

4 页岩油气储层改造技术的发展建议

基于页岩油气储层改造 4 个方面的技术挑战,提出了加强基础研究、完善技术配套、提高储量动用率和推进数字化转型 4 项发展建议,旨在为页岩油气资源的大规模动用和高效益开发提供理论指导。

4.1 加强基础研究,筑牢页岩油气规模发展基石

基于页岩储层渗透率低、比表面积大、非均质性强、叠置层系多、配套工具强度要求高 5 个基本属性,加强“渗流规律与布井布缝,地应力场、岩石力学与裂缝扩展,支撑剂输送与裂缝导流”等方面的研究,可为页岩储层的高效改造提供理论支撑^[51]。

具体包括:①复杂裂缝渗流规律。以非线性渗流为指导,揭示页岩油气分子在孔隙—裂缝系统的微观热运动机理,分析页岩储层在改造后有效缝控范围内多相流体的多尺度渗流规律,明确页岩油气有效渗流体积与产量递减率的关系,为科学的井网井距—段簇间距—改造规模协同优化提供理论指导^[52]。②储层改造基础研究。在精细刻画储层地应力场和地质力学性质分布规律的基础上明确水力裂缝与天然裂缝交互作用影响,揭示水平应力差—应力干扰—节流摩阻—暂堵转向之间的关系,深入分析全生命周期内水力裂缝的多维扩展形态,为页岩油气储层压裂改造的靶体优化提供理论支撑,从而提升压裂方案设计的质量。

4.2 完善技术配套,构建中国特色压裂技术体系

加强“压裂工具升级、压裂软件研发、压裂液个性化设计和支撑剂应用规模”等方面的攻关力度,可为页岩储层的高效改造提供理论基础^[53]。

具体包括:①压裂工具升级和优化。从压裂作业、井筒排采、井下措施等作业一体化角度优选和优化压裂工具,加大电动滑套等高时效和高效费比压裂工具

攻关力度,布局水平井分段压裂生产测试快速解释系统等井下作业工具。②加快 FrSmart 压裂软件研发及方案设计。加速中国远程决策中心建设,构建人工智能的储层改造优化设计和实施决策系统,应用自主化地质—工程一体化压裂优化设计软件支撑现场压裂方案设计,实现储量的高效动用。③研发个性化压裂液。揭示压裂液降阻、页岩储层伤害等机理,研发匹配不同页岩储层需求的个性化压裂液体系。④扩大低成本支撑剂应用规模。揭示支撑剂在地层条件下导流性能的变化规律,优选适合页岩储层特性的石英砂。

4.3 提高储量动用率,构建全生命周期技术体系

提高剩余油气精细刻画程度,加大膨胀管技术适应性研究,提高老井筒完整性,实现段间精细挖潜,促进页岩油气水平井持续稳产和高产^[54]。

具体包括:①段间精细挖潜。升级防 CO₂ 和 Cl⁻ 膨胀管管材,发展液囊膨胀等新型方式,提升封堵作业效率与技术适应性。加强剩余油分布、地应力场、重复压裂裂缝扩展规律研究,开展全生命周期的地质工程一体化设计与实施。②加大水平井井筒重构重复压裂技术攻关。通过完善双层套管射孔,优化窄间隙固井材料来发展尾管固井井筒重构技术;研制百米级水平段膨胀管连续重构工具;攻关化学封固关键材料与作业工艺;强化初次压裂综合评估与重复压裂优化设计研究,形成基于井筒重构的水平井重复压裂技术系列。

4.4 推进数字化转型,构建物联网智能发展格局

加快创新与储层改造相关的物联网、大数据、云计算技术,建设科学化工程造价与数字化监督管理体系,实现数字化转型、标准化建设、智能化发展,构建压裂技术高质量发展新格局,助力页岩油气资源的提质增效。

具体包括:①创新物联网、大数据、云计算技术。构建压裂改造数字化平台,加速中国远程决策中心网络体系建设,实现资源实时共享,逐步将压裂各个环节实现物联网,构建人工智能的储层改造和实施决策系统。②创新工程造价体系。建立中国的科学造价平台,实现全要素计价、全过程计量,构建定额标准、智能算量体系,构建工程定额造价理论体系,完善造价理论体系、标准与方法,实现工程造价与成本、效益的有机统一。③健全工程监督体系。基于 Heinrich 法则和墨菲定律,建立油气井工程质量监督理论体系与方法,建设数字化监督平台,培养业务专家型监督队伍,实现全过程监督、故障预警、事故报警和自动化信息反馈。④构建标准化平台。做好“与核心技术相结合,开展超前标准研发”、“与重点实验室结合,使科技成果标准化”、“与现存的短板挑战相结合,制定标准发展规划”

这 3 个结合,并以此推动页岩油气业务高质量规模化发展。

5 结 论

(1) 美国页岩油气储层改造技术不断向裂缝控藏认识、压裂监测技术、重复压裂技术、数据平台建设和矿场实验室建设 5 个方面深入发展,可有效解决“缝控”储量动用、裂缝动态诊断、油气井生命周期延长、地质工程一体化建设、室内研究与现场应用有机结合的问题。

(2) 基于页岩油气储层改造的室内基础研究和现场示范应用的成功经验,系统总结了具有中国特色的页岩油气储层改造的 7 项关键技术:缝控压裂优化技术、新型压裂配套装备、分段压裂核心工具、低成本压裂材料、水力裂缝监测技术、井筒重构压裂技术和压裂优化软件设计。

(3) 结合页岩储层物性特征、地质甜点、矿物组分和敏感性参数,以及页岩油气的赋存状态和流动性质,深度剖析了页岩油气储层改造面临的技术挑战:①页岩储层物性较差,甜点有效甄别面临挑战;②流体渗流规律复杂,压裂参数优化面临挑战;③储层纵向多层叠置,储量立体动用面临挑战;④早期改造矛盾突出,剩余储量挖潜面临挑战。

(4) 针对页岩油气储层技术改造,为实现页岩油气的大规模建产与高效益开发,提出了 4 个方面的发展建议:①加强基础研究,筑牢页岩油气规模发展基石;②完善技术配套,构建中国特色压裂技术体系;③提高储量动用率,构建全生命周期技术体系;④推进数字化转型,构建物联网智能发展格局。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 雷群,王红岩,赵群,等. 国内外非常规油气资源勘探开发现状与建议[J]. 天然气工业,2008,28(12):7-10.
LEI Qun, WANG Hongyan, ZHAO Qun, et al. Status analysis and advices on exploration and development of unconventional hydrocarbon resources[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(12): 7-10.
- [3] JACOBS T. Shale refracs: next big thing, or a piece of the big puzzle? [J]. Journal of Petroleum Technology, 2022, 74(11): 18-26.
- [4] 谢军. 长宁—威远国家级页岩气示范区建设实践与成效[J]. 天然气工业,2018,38(2):1-7.

- XIE Jun. Practices and achievements of the Changning-Weiyuan shale gas national demonstration project construction[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(2): 1-7.
- [5] 梁兴,单长安,王维旭,等. 昭通国家级页岩气示范区勘探开发进展及前景展望[J]. *天然气工业*, 2022, 42(8): 60-77.
LIANG Xing, SHAN Chang'an, WANG Weixu, et al. Exploration and development in the Zhaotong national shale gas demonstration area; progress and prospect [J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(8): 60-77.
- [6] 国家能源局. 国家能源局公布 2021 年能源成绩单[EB/OL]. [2023-01-01]. https://www.nea.gov.cn/2021-12/24/c_1310391383.htm. National Energy Administration. National Energy Agency Announces 2021 Energy Report [EB/OL]. [2023-01-01]. https://www.nea.gov.cn/2021-12/24/c_1310391383.htm.
- [7] 邹才能,潘松圻,荆振华,等. 页岩油气革命及影响[J]. *石油学报*, 2020, 41(1): 1-12.
ZOU Caineng, PAN Songqi, JING Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(1): 1-12.
- [8] 雷群,翁定为,罗键辉,等. 中国石油油气开采工程技术进展与发展方向[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(1): 139-145.
LEI Qun, WENG Dingwei, LUO Jianhui, et al. Achievements and future work of oil and gas production engineering of CNPC [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(1): 139-145.
- [9] 付锁堂,金之钧,付金华,等. 鄂尔多斯盆地延长组 7 段从致密油到页岩油认识的转变及勘探开发意义[J]. *石油学报*, 2021, 42(5): 561-569.
FU Suotang, JIN Zhijun, FU Jinhua, et al. Transformation of understanding from tight oil to shale oil in the Member 7 of Yanchang Formation in Ordos Basin and its significance of exploration and development [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(5): 561-569.
- [10] MAZZA J, KEGEL J, VAN DELINDER S, et al. A geomechanics and pore pressure informed stage level optimization case study for unconventional, infill development in the Powder River Basin [R]. SPE 3869179, 2023.
- [11] 雷群,翁定为,管保山,等. 中美页岩油气开采工程技术对比及发展建议[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(4): 824-831.
LEI Qun, WENG Dingwei, GUAN Baoshan, et al. Shale oil and gas exploitation in China; technical comparison with US and development suggestions [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(4): 824-831.
- [12] 付金华,李士祥,郭芪恒,等. 鄂尔多斯盆地陆相页岩油富集条件及有利区优选[J]. *石油学报*, 2022, 43(12): 1702-1716.
FU Jinhua, LI Shixiang, GUO Qiheng, et al. Enrichment conditions and favorable area optimization of continental shale oil in Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(12): 1702-1716.
- [13] 邵红梅,高波,洪淑新,等. 页岩油储层实验技术进展及应用——以松辽盆地古龙地区为例[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(3): 97-106.
SHAO Hongmei, GAO Bo, HONG Shuxin, et al. Progress and application of the experimental technologies for the shale oil reservoirs; a case study of Gulong area in Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(3): 97-106.
- [14] 郭建春,马莅,卢聪. 中国致密油藏压裂驱油技术进展及发展方向[J]. *石油学报*, 2022, 43(12): 1788-1797.
GUO Jianchun, MA Li, LU Cong. Progress and development directions of fracturing flooding technology for tight reservoirs in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(12): 1788-1797.
- [15] 胥云,雷群,陈铭,等. 体积改造技术理论研究进展与发展方向[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 874-887.
XU Yun, LEI Qun, CHEN Ming, et al. Progress and development of volume stimulation techniques [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 874-887.
- [16] 雷群,胥云,才博,等. 页岩油气水平井压裂技术进展与展望[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(1): 166-172.
LEI Qun, XU Yun, CAI Bo, et al. Progress and prospects of horizontal well fracturing technology for shale oil and gas reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(1): 166-172.
- [17] FOWLER G, ZAGHLOUL J, JONES D, et al. A success story: screening and optimizing refracs in the Eagle Ford [R]. SPE 3848875, 2023.
- [18] EICHINGER K, FRENCH S, DAY K, et al. Hybrid expandable liner system; a performance-enhancing, cost-effective alternative to bullhead refracturing [R]. SPE 3855094, 2023.
- [19] ABE A, KIM T W, HORNE R N. Laboratory hydraulic stimulation experiments to investigate the interaction between newly formed and preexisting fractures [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 141: 104665.
- [20] LESHCHYSHYN T, VANDE A, BARBA R, et al. Refrac and re-complete whole history in the North Dakota; determining detailed type and sub-type of refrac and incremental production [R]. SPE 3871674, 2023.
- [21] 吴奇,胥云,张守良,等. 非常规油气藏体积改造技术核心理论与优化设计关键[J]. *石油学报*, 2014, 35(4): 706-714.
WU Qi, XU Yun, ZHANG Shouliang, et al. The core theories and key optimization designs of volume stimulation technology for unconventional reservoirs [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(4): 706-714.
- [22] FRANK M, BETHANY R, ROBIN D. Statistical analysis of fractures from the hydraulic fracture test site 1 [C]// SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, Houston, Texas, USA, July 2021. Houston: SPE/AAPG/SEG, 2021.
- [23] 雷群,翁定为,管保山,等. 基于缝控压裂优化设计的致密油储集层改造方法[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(3): 592-599.
LEI Qun, WENG Dingwei, GUAN Baoshan, et al. A novel approach of tight oil reservoirs stimulation based on fracture controlling optimization and design [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(3): 592-599.
- [24] 雷群,杨战伟,翁定为,等. 超深裂缝性致密储集层提高缝控改造体积技术——以库车山前碎屑岩储集层为例[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(5): 1012-1024.
LEI Qun, YANG Zhanwei, WENG Dingwei, et al. Techniques for improving fracture-controlled stimulated reservoir volume in ultra-deep fractured tight reservoirs; a case study of Kuqa piedmont clastic reservoirs, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(5): 1012-1024.

- [25] 李国欣,刘国强,侯雨庭,等.陆相页岩油有利岩相优选与压裂参数优化方法[J].石油学报,2021,42(11):1405-1416.
LI Guoxin, LIU Guoqiang, HOU Yuting, et al. Optimization method of favorable lithofacies and fracturing parameter for continental shale oil[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(11): 1405-1416.
- [26] 雷群,翁定为,熊生春,等.中国石油页岩油储集层改造技术进展及发展方向[J].石油勘探与开发,2021,48(5):1035-1042.
LEI Qun, WENG Dingwei, XIONG Shengchun, et al. Progress and development directions of shale oil reservoir stimulation technology of China National Petroleum Corporation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(5): 1035-1042.
- [27] 雷群,管保山,才博,等.储集层改造技术进展及发展方向[J].石油勘探与开发,2019,46(3):580-587.
LEI Qun, GUAN Baoshan, CAI Bo, et al. Technological progress and prospects of reservoir stimulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 580-587.
- [28] 端祥刚,吴建发,张晓伟,等.四川盆地海相页岩气提高采收率研究进展与关键问题[J].石油学报,2022,43(8):1185-1200.
DUAN Xianggang, WU Jianfa, ZHANG Xiaowei, et al. Progress and key issues in the study of enhanced recovery of marine shale gas in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(8): 1185-1200.
- [29] 贾庆升,张全胜,杨祥祥,等.压裂工具动态模拟试验信息处理方法研究[J].石油机械,2014,42(2):73-76.
JIA Qingsheng, ZHANG Quansheng, YANG Xiangxiang, et al. Method for information processing on the dynamic simulation test of fracturing tool[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(2): 73-76.
- [30] 刘巨保,黄茜,杨明,等.水平井分段压裂工具技术现状与展望[J].石油机械,2021,49(2):110-119.
LIU Jubao, HUANG Qian, YANG Ming, et al. Current status and prospects of horizontal well staged fracturing tools and technologies[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(2): 110-119.
- [31] 叶登胜,李斌,周正,等.新型速钻复合桥塞的开发与应用[J].天然气工业,2014,34(4):62-66.
YE Dengsheng, LI Bin, ZHOU Zheng, et al. Development and application of a new fast-drilling composite plug[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(4): 62-66.
- [32] 李国欣,罗凯,石德勤.页岩油气成功开发的关键技术、先进理念与重要启示—以加拿大都沃内项目为例[J].石油勘探与开发,2020,47(4):739-749.
LI Guoxin, LUO Kai, SHI Deqin. Key technologies, engineering management and important suggestions of shale oil/gas development: case study of a Duvernay shale project in Western Canada Sedimentary Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 739-749.
- [33] 雷群,胥云,杨战伟,等.超深油气储集层改造技术进展与研究方向[J].石油勘探与开发,2021,48(1):193-201.
LEI Qun, XU Yun, YANG Zhanwei, et al. Progress and development directions of stimulation techniques for ultra-deep oil and gas reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 193-201.
- [34] ZOU Yushi, MA Xinfang, ZHANG Shicheng, et al. Numerical investigation into the influence of bedding plane on hydraulic fracture network propagation in shale formations[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(9): 3597-3614.
- [35] 李彦超,何响宾,肖剑锋,等.页岩气水平井重复压裂层段优选与效果评估[J].天然气工业,2018,38(7):59-64.
LI Yanchao, HE Yunbin, XIAO Jianfeng, et al. Optimal selection and effect evaluation of re-fracturing intervals of shale-gas horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(7): 59-64.
- [36] 万晓龙,高春宁,王永康,等.人工裂缝与天然裂缝耦合关系及其开发意义[J].地质力学学报,2009,15(3):245-252.
WAN Xiaolong, GAO Chunning, WANG Yongkang, et al. Coupled relationship between created and natural fractures and its implication to development[J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15(3): 245-252.
- [37] 陈桂华,白玉湖,陈晓智,等.页岩油气纵向综合甜点识别新方法及量化评价[J].石油学报,2016,37(11):1337-1342.
CHEN Guihua, BAI Yuhu, CHEN Xiaozhi, et al. A new identification method for the longitudinal integrated shale oil/gas sweet spot and its quantitative evaluation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1337-1342.
- [38] LISJAK A, GRASSELLI G. A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(4): 301-314.
- [39] 袁俊亮,邓金根,张定宇,等.页岩气储层可压裂性评价技术[J].石油学报,2013,34(3):523-527.
YUAN Junliang, DENG Jingen, ZHANG Dingyu, et al. Fracability evaluation of shale-gas reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 523-527.
- [40] PEI Yanli, YU Wei, SEPEHRNOORI K, et al. The influence of development target depletion on stress evolution and infill drilling of upside target in the Permian Basin [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2021, 24(3): 570-589.
- [41] 赵金洲,许文俊,李勇明,等.页岩气储层可压性评价新方法[J].天然气地球科学,2015,26(6):1165-1172.
ZHAO Jinzhou, XU Wenjun, LI Yongming, et al. A new method for fracability evaluation of shale-gas reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(6): 1165-1172.
- [42] 李旭,蔡进功,宋明水,等.泥页岩烃—孔隙—表面的关系及其对残留烃评价的意义[J].地球科学进展,2018,33(5):493-505.
LI Xu, CAI Jingong, SONG Mingshui, et al. The relationships among hydrocarbon-pore-surface in shale rocks and their significance for the evaluation of residual hydrocarbons [J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(5): 493-505.
- [43] 田华,张水昌,柳少波,等.富有机质页岩成分与孔隙结构对吸附气赋存的控制作用[J].天然气地球科学,2016,27(3):494-502.
TIAN Hua, ZHANG Shuichang, LIU Shaobo, et al. The dual influence of shale composition and pore size on adsorption gas storage mechanism of organic-rich shale [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(3): 494-502.
- [44] 黄瑞,陈军斌,王佳部,等.考虑水敏性的页岩黏土多相耦合甲烷吸附模型[J].特种油气藏,2019,26(5):92-99.
HUANG Rui, CHEN Junbin, WANG Jiabu, et al. Multi-phase coupling methane adsorption model with water sensitivity for shale clay [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(5): 92-99.
- [45] 张丰收,吴建发,黄浩勇,等.提高深层页岩裂缝扩展复杂程度的

- 工艺参数优化[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 125-135.
- ZHANG Fengshou, WU Jianfa, HUANG Haoyong, et al. Technological parameter optimization for improving the complexity of hydraulic fractures in deep shale reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(1): 125-135.
- [46] HANSON M E, SHAFFER R J, ANDERSON G D. Effects of various parameters on hydraulic fracturing geometry[J]. *SPE Journal*, 1981, 21(4): 435-443.
- [47] 雷群, 胥云, 蒋廷学, 等. 用于提高低-特低渗透油气藏改造效果的缝网压裂技术[J]. 石油学报, 2009, 30(2): 237-241.
- LEI Qun, XU Yun, JIANG Tingxue, et al. "Fracture network" fracturing technique for improving post-fracturing performance of low and ultra-low permeability reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(2): 237-241.
- [48] 于学亮, 胥云, 翁定为, 等. 页岩油藏“密切割”体积改造产能影响因素分析[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2020, 42(3): 132-143.
- YU Xueliang, XU Yun, WENG Dingwei, et al. Factors influencing the productivity of the multi-fractured shale oil reservoir with tighter clusters[J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2020, 42(3): 132-143.
- [49] 钱斌, 张俊成, 朱炬辉, 等. 四川盆地长宁地区页岩气水平井组“拉链式”压裂实践[J]. 天然气工业, 2015, 35(1): 81-84.
- QIAN Bin, ZHANG Juncheng, ZHU Juhui, et al. Application of zipper fracturing of horizontal cluster wells in the Changning shale gas pilot zone, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(1): 81-84.
- [50] 许冬进, 廖锐全, 石善志, 等. 致密油水平井体积压裂工厂化作业模式研究[J]. 特种油气藏, 2014, 21(3): 1-6.
- XU Dongjin, LIAO Ruiquan, SHI Shanzhi, et al. Research on factory-like volumetric fracturing in horizontal wells for tight oil[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2014, 21(3): 1-6.
- [51] LIU Zhiyuan, CHEN Mian, ZHANG Guangqing. Analysis of the influence of a natural fracture network on hydraulic fracture propagation in carbonate formations[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(2): 575-587.
- [52] CHENG Yueming. Impacts of the number of perforation clusters and cluster spacing on production performance of horizontal shale-gas wells[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2012, 15(1): 31-40.
- [53] 邹才能, 赵群, 丛连铸, 等. 中国页岩气开发进展、潜力及前景[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 1-14.
- ZOU Caineng, ZHAO Qun, CONG Lianzhou, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(1): 1-14.
- [54] 高德利, 刘奎, 王宴滨, 等. 页岩气井井筒完整性失效力学机理与设计控制技术若干研究进展[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1798-1812.
- GAO Deli, LIU Kui, WANG Yanbin, et al. Some research advances in the failure mechanism and design & control technologies of shale gas well integrity[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(12): 1798-1812.

(收稿日期 2022-10-28 改回日期 2023-10-07 编辑 王培玺)