



## 庆城夹层型页岩油地质工程一体化压裂技术

慕立俊 拜杰 齐银 薛小佳

### Geological Engineering Integrated Fracturing Technology for Qingcheng Interlayer Shale Oil

MU Lijun, BAI Jie, QI Yin, XUE Xiaojia

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023079>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 鄂尔多斯盆地页岩油体积压裂技术实践与发展建议

Practice and Development Suggestions for Volumetric Fracturing Technology for Shale Oil in the Ordos Basin

石油钻探技术. 2021, 49(4): 85–91 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021075>

#### 玛湖凹陷风城组页岩油巨厚储层直井体积压裂关键技术

Key Technology of Volumetric Fracturing in Vertical Wells of Hugely Thick Shale Oil Reservoirs in the Fengcheng Formation of the Mahu Sag

石油钻探技术. 2021, 49(4): 99–105 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021092>

#### 川南深层页岩气水平井体积压裂关键技术

Key Technology of Volumetric Fracturing in Deep Shale Gas Horizontal Wells in Southern Sichuan

石油钻探技术. 2020, 48(5): 77–84 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020073>

#### 页岩气储层工程地质力学一体化技术进展与探讨

Advances in Shale Gas Reservoir Engineering and Geomechanics Integration Technology and Relevant Discussions

石油钻探技术. 2017, 45(2): 25–31 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201702005>

#### 南海低渗透储层支撑剂导流能力试验研究

Experimental Study of Proppant Conductivity in Low Permeability Reservoirs in the South China Sea

石油钻探技术. 2021, 49(6): 86–92 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021064>

#### 吉木萨尔页岩油下甜点二类区水平井压裂技术

Fracturing Technologies for Horizontal Wells in the Second-Class Shale Oil Reservoirs of the Lower Sweet Spot Areas in Jimusar

石油钻探技术. 2021, 49(4): 112–117 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021089>



扫码关注公众号，获取更多信息！

doi:10.11911/syztjs.2023079

引用格式: 慕立俊, 拜杰, 齐银, 等. 庆城夹层型页岩油地质工程一体化压裂技术 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(5): 33-41.

MU Lijun, BAI Jie, QI Yin, et al. Geological engineering integrated fracturing technology for Qingcheng interlayer shale oil [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(5): 33-41.

## 庆城夹层型页岩油地质工程一体化压裂技术

慕立俊<sup>1,2</sup>, 拜杰<sup>1,2</sup>, 齐银<sup>1,2</sup>, 薛小佳<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院, 陕西西安 710018; 2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西西安 710018)

**摘 要:** 针对庆城夹层型页岩油储层物性致密、原始油藏压力系数低和湖相沉积非均质性强的特点, 采用大型物理模拟试验、水平检查井取心观察和微地震频度与震级分析等方法, 明确了裂缝系统以人工主裂缝为主、支/微裂缝为辅; 根据细分切割裂缝思路, 采用桥塞/球座分段多簇射孔联作工艺为主体技术; 从地质工程甜点综合特征出发, 优化布缝策略、段簇组合和簇间距; 基于限流压裂原理, 采用暂堵控制多簇裂缝扩展, 以大量现场压裂资料为样本集, 优化压裂关键参数; 根据压裂对缝网导流能力的需求, 优化压裂液和支撑剂的粒径组合。通过上述研究, 形成了庆城夹层型页岩油地质工程一体化压裂技术。庆城页岩油区块的 180 口水平井应用页岩油地质工程一体化压裂技术完成 4 590 段压裂, 压裂后单井初期产量达到了 14.5 t/d, 第 1 年产量递减率降低 10 个百分点以上。研究和现场应用表明, 页岩油地质工程一体化压裂技术可以实现油藏与裂缝的匹配, 有效支撑了庆城页岩油百万吨级产能建设, 为陆相页岩油资源高效动用和效益开发提供了技术支持。

**关键词:** 夹层型页岩油; 地质工程一体化; 体积压裂; 支撑剂; 导流能力

中图分类号: TE357.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)05-0033-09

## Geological Engineering Integrated Fracturing Technology for Qingcheng Interlayer Shale Oil

MU Lijun<sup>1,2</sup>, BAI Jie<sup>1,2</sup>, QI Yin<sup>1,2</sup>, XUE Xiaojia<sup>1,2</sup>

(1. Oil and Gas Technology Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi, 710018, China;  
2. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi, 710018, China)

**Abstract:** Qingcheng interlayer shale oil possesses the characteristics of tight reservoirs, a low pressure coefficient in the original reservoirs, and significant heterogeneity in lacustrine sediment. According to the methods of large-scale physical model experiment, coring observation of horizontal inspection wells, and microseismic frequency and magnitude analysis, the fracture morphology of the fracture system was mainly artificial main fracture, followed by branch/microfractures. The idea of subdividing and cutting fractures was applied, and the segmented multi-cluster perforation joint cropping process using bridge plug/ball block was taken as the main technology. Starting from the comprehensive sweet spot characteristics of geological engineering, the fracture layout strategy, segment and cluster combinations, and cluster spacing were optimized. Based on the principle of limited entry fracturing, the multi-cluster fracture propagation was controlled by temporary plugging, and the key parameters of fracturing were optimized with a large number of on-site fracturing data as the sample set. According to the demands for fracture network flow conductivity, the particle size combination of fracturing fluid and proppant was optimized, and the development of a geological engineering integrated fracturing technology specific to Qingcheng interlayer shale oil was formed. The 180 horizontal wells in Qingcheng shale oil block were fractured in 4 590 stages using the geological engineering integrated fracturing technology. After fracturing, the initial production of a single well reached 14.5 t/d, and the production decline rate in the first year was reduced by more than 10 percentage points. The research and field applications have demonstrated that the geological engineering integrated fracturing technology for shale oil can effectively match oil reservoirs and fractures, thereby providing vital support for achieving a million-ton production capacity in Qingcheng

收稿日期: 2023-05-16; 改回日期: 2023-08-22。

作者简介: 慕立俊 (1969—), 男, 陕西西安人, 1992 年毕业于石油大学 (华东) 采油工程专业, 2011 年获西安交通大学材料科学与工程专业博士学位, 正高级工程师, 主要从事低渗、非常规油藏开发研究和技术管理工作。E-mail: mulj\_cq@petrochina.com.cn。

基金项目: 中国石油与天然气集团公司前瞻性基础性战略性技术攻关项目“页岩油水平井缝控压裂技术研究” (编号: 2021DJ4506) 资助。

shale oil. This technology also contributes to the efficient utilization and beneficial development of continental shale oil resources.

**Key words:** interlayer shale oil; Integration of geological engineering; volume fracturing; proppant; flow conductivity

非常规储层流体流动性差,水平井分段体积压裂是国内外非常规储层实现有效开发的主体技术,其主要理念是通过体积压裂的方式“打碎”储集体,实现长、宽、高三维方向“立体改造”,使裂缝壁面与储层基质的接触面积最大,促使油气从任意方向的基质向裂缝的渗流距离最短,极大地提高储层的渗透率<sup>[1-5]</sup>。要实现体积压裂,核心在于对甜点的精细判识与裂缝的精准布放。但对于国内陆相页岩油,尤其是庆城夹层型页岩油,与国外海相页岩油储层相比,非均质性更强,储层变化更快,岩性组合更复杂,甜点的识别难度更大。裂缝段簇如何布放、间距如何优化、规模如何设计,都需要研究;同时,也需要与甜点特征及规模进行匹配。因此,庆城页岩油开发对于地质工程一体化压裂技术提出了更高的要求。

庆城长7夹层型页岩油属于湖相碎屑流沉积,砂体展布复杂,砂泥互层发育,储层非均质性较强,油藏渗透率低,储层压力、流体性质存在变化,天然裂缝、断层发育。前期勘探评价阶段,由于对储层描述不够精细,对甜点品质认识不清,采用大间距(>30 m)布缝、大排量压裂的改造模式未能实现裂缝对储层的有效控制,单井产量未取得有效突破(单井日产油量<10 t)。通过多年攻关研究与矿场实践,压裂技术不断迭代升级,但始终围绕不断加深地质工程一体化融合程度展开。目前以PETREL软件为基础平台,构建了多专业一体化工作流程。地质油藏方面,开展精细的油藏及力学参数三维建模,对甜点三维品质、天然裂缝及断层特征进行有效刻画。工艺方面,以“多簇射孔密布缝+可溶球座硬封隔+暂堵转向软分簇”的高效体积压裂工艺为主体,采用高密度细分切割,以缩短缝间距(10~15 m),结合精细的三维甜点品质判识,针对不同品质甜点进行差异化的布缝及参数优化设计。压裂液与支撑剂选择方面,结合储层特征及需求,进行差异化的粒径组合及压裂液配方优化设计。配套方面,采取差异化限流射孔及暂堵方法,辅助提升裂缝精细控制程度。同时,发挥百井上千段大数据样本的作用,通过高产井参数,进一步综合优化工程参数范围及界限组合。最终,通过地质工程一体化压裂技术,提升了平台和单井压裂方案的适配

性,推动了庆城页岩油大规模效益开发。

## 1 庆城页岩油地质基本概况

鄂尔多斯盆地庆城页岩油长7储层埋深1 600~2 200 m,基质渗透率0.11~0.14 mD,孔隙度6%~12%,气油比75~122 m<sup>3</sup>/t,原油黏度1.35 mPa·s,压力系数0.77~0.84,脆性指数0.39~0.45,两向水平应力差3~5 MPa。与北美二叠盆地页岩油储层相比,鄂尔多斯盆地庆城页岩油储层具有脆性指数和压力系数低的特点,直接照搬北美压裂模式,难以实现规模效益开发。中国陆相页岩油分为夹层型、混积型和页岩型3大类(见图1)<sup>[6]</sup>,鄂尔多斯盆地庆城长7页岩油主要发育夹层型和页岩型。庆城页岩油储层岩性主要为粉细砂岩,天然裂缝密度1.45条/m(基于70余口井17 000多米长的岩心描述),页理发育不明显。总体看来,鄂尔多斯盆地庆城长7页岩油储层压力系数低,非均质性强,形成复杂裂缝的岩性基础较差,但又具有原油黏度低、天然裂缝广泛发育等优势<sup>[4,7-11]</sup>。

## 2 庆城页岩油储层水力裂缝认识

综合利用大型物理模拟试验、水平检查井取心观察和微地震测试等方法,分析庆城页岩油储层水力裂缝特征。采集4块尺寸为1 m×1 m×1 m的页岩油天然露头岩样(微裂缝、结构弱面发育程度不同),进行水力压裂大型物理模拟试验(采用黏度3~5 mPa·s的滑溜水,夹持岩样的两向水平主应力相等),观测到微裂缝发育的岩样有一定程度的复杂裂缝,而微裂缝不发育的岩样以单一主裂缝为主。选取页岩油大排量压裂改造直井(排量6.0 m<sup>3</sup>/min,入地液量630 m<sup>3</sup>,井下微地震监测裂缝带长310 m、带宽80 m),在垂直最大水平主应力方向(即垂直水力裂缝方向)、距离压裂井东侧50 m的微地震监测事件区域内,部署一口水平取心井AP1井,该井水平段长80 m,与微地震带宽相同,观察取出岩心发现3条水力裂缝,且集中在垂直最大水平主应力方向10 m范围内,裂缝总体波及痕迹远小于与微地震事件的带宽。庆城页岩油区块32口井371段井下



甜点主要类型		典型实例	油藏剖面	主要地质特征
夹 层 型	砂岩型	鄂尔多斯盆地长 7 <sub>1</sub> 、长 7 <sub>2</sub> 段		源储共存, 页岩层系整体含油, 薄层砂岩有利储集层近源捕获石油形成甜点
	凝灰岩型	三塘湖盆地马郎凹陷条湖组		源储共存, 页岩层系整体含油, 凝灰质有利储集层近源捕获石油形成甜点
混 积 型	砂质云质型	准东吉木萨尔凹陷芦草沟组		源储共存, 页岩层系整体含油, 砂质、钙质等有利储集层源内捕获石油形成甜点
	白云质型	渤海湾盆地沧东凹陷孔二段		源储共存, 页岩层系整体含油, 白云质等有利储集层源内捕获石油形成甜点
	灰质型	四川盆地湖盆中部大安寨段		源储共存或一体, 页岩层系整体含油, 灰质岩有利储集层源内捕获石油形成甜点
页 岩 型	纹层型	鄂尔多斯盆地长 7 <sub>3</sub> 含粉细砂泥页岩段 松辽盆地湖盆中部青二段		源储一体, 页岩整体含油, 砂质、钙质页岩有利储集层源内捕获石油形成甜点
	页理型	鄂尔多斯盆地长 7 <sub>3</sub> 纯页岩段 松辽盆地湖盆中部青一段		源储一体, 页岩整体含油, 砂质、钙质页岩有利储集层原地滞留石油形成甜点

图 1 中国陆相页岩油甜点主要类型及地质特征

Fig.1 Main types and geological characteristics of continental shale oil sweet spots in China

微地震数据统计结果表明, 与国内外非常规储层压裂相比, 庆城页岩油区块裂缝复杂指数明显偏低 (裂缝复杂指数平均小于 0.20), 裂缝多以单一缝为主并辅助少量天然裂缝 (见图 2)。

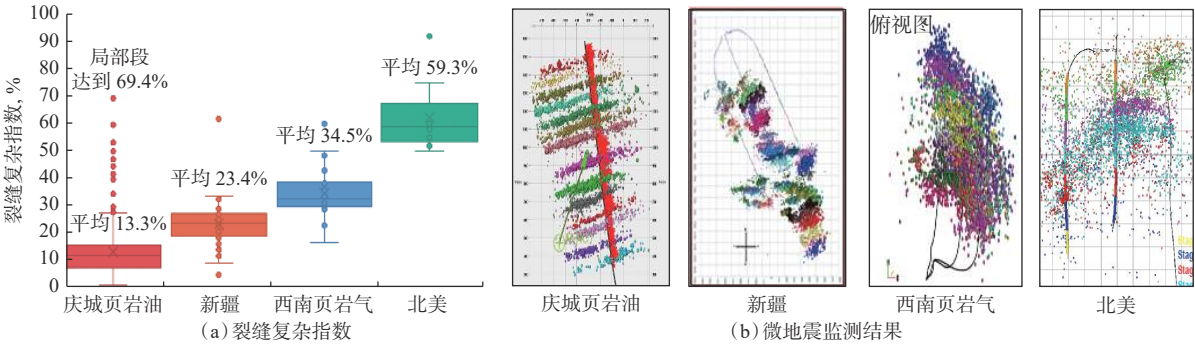


图 2 庆城页岩油与国内外典型页岩油气区块裂缝复杂指数及微地震监测结果

Fig.2 Fracture complexity index and microseismic monitoring results of Qingcheng shale oil and typical shale oil and gas blocks in China and abroad

利用微地震矩张量反演技术解释 3 口井 (2 口水平井和 1 口直井) 微地震同时监测的数据, 可以获得水力裂缝的长度、高度、形态及支撑剂支撑裂缝长度。利用微地震矩张量反演技术解释 NP9 井的多井微地震监测数据, 得知支撑剂输送距离较短, 不足水力裂缝的一半 (见图 3)。

基于油藏模拟方法, 进行 NP9 井压裂后的产能拟合, 根据 15 年后的产能预测压力场, 再根据压力场反算有效裂缝波及体积, 发现该井水力裂缝对储层的有效波及程度不足 50%。HH85-X 井射孔 8 簇, 簇间距 7.80 m, 以 9.5 m<sup>3</sup>/min 排量注入 1 460 m<sup>3</sup> 液量进行压裂, 利用光纤监测压裂过程, 发现各射孔簇全部起裂进液, 但进液不均衡, 最少进液射孔簇的进液量占比 7.3%, 最多进液射孔簇的进液量占比 18.1% (见图 4)。分段多簇压裂扩展过程复杂, “射孔簇多起裂、进液有差异、调节由压力”, 簇间非均质性、天然裂缝的影响显著, 多簇非均衡扩展现象严重。

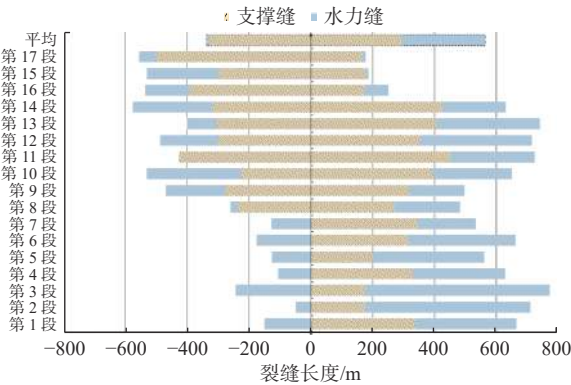


图 3 NP9 井多井微地震矩张量反演有效裂缝半长

Fig.3 Effective fracture half-length by multi-well microseismic moment tensor interpretation of Well NP9

体积压裂是长庆油田页岩油开发的核心技术<sup>[12-14]</sup>, 而庆城前期页岩油水平井压裂后单井产量低且递减快、供液不足, 认为水力裂缝的复杂程度较低是主要原因, 主要表现在以下 3 个方面: 1) 裂缝以单一

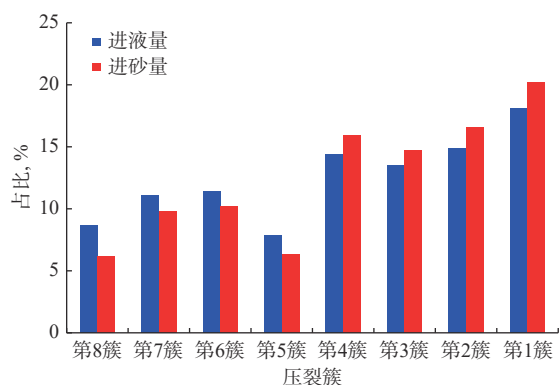


图4 H85-X井基于光纤DAS/DTS解释各簇砂液分布  
Fig.4 Distribution of sand liquid of each cluster in Well HH85-X based on optical fiber DAS/DTS interpretation

主缝为主,大缝间距(大于20 m)的压裂模式,裂缝不足以对油藏实现有效控制;2)支撑剂输送距离近,造成支撑缝长短,导致井间动用程度低;3)段内非均质性造成裂缝扩展不均匀,缝间动用程度低。

### 3 庆城页岩油细分切割体积压裂技术

#### 3.1 射孔簇数及簇间距优化

页岩油水平井压裂分段、簇间距设计是影响压裂效果和压裂成本的关键。簇间距大,缝间扩展干扰小,利于多簇扩展,但簇间距过大会导致裂缝对储层控制程度不足;簇间距小,可提高多簇裂缝复杂性,利于增大与储层的接触面积,但簇间距过小影响多簇扩展的均衡性,同时相同甜点段所需压裂段数增多。兼顾优质甜点最大化改造和压裂成本控制,根据储层分类分级结果制定了差异化的压裂策略,Ⅰ类和Ⅱ类储层进行最大化细分切割改造,Ⅲ类储层考虑其产量贡献度低和经济性不佳,通常不进行改造。建立了长7页岩油储层非常规复杂缝网模型,模型尺寸为600 m×60 m×10 m,利用该模型模拟裂缝扩展时,可综合考虑储层非均质性、应力各向异性、水力裂缝和天然裂缝的相互作用、水力裂缝之间的相互作用(应力阴影效应)。利用该模型模拟了60 m长水平段,射孔2簇、簇间距30.00 m,射孔4簇、簇间距15.00 m和射孔6簇、簇间距7.50 m时的裂缝扩展形态,结果表明:簇间距为30.00 m时,应力阴影影响小,水力裂缝呈独立扩展,但模拟显示裂缝对储层的控制程度不足;簇间距为15.00 m时,应力阴影对裂缝扩展有一定影响,有的裂缝发生转向,有的裂缝扩展有限,整体裂缝复杂

程度有所增加,缝间压力场扩散较充分;簇间距为7.50 m时,水力裂缝之间竞争强烈,导致很多水力裂缝扩展有限,整体改造范围较小(见图5)。

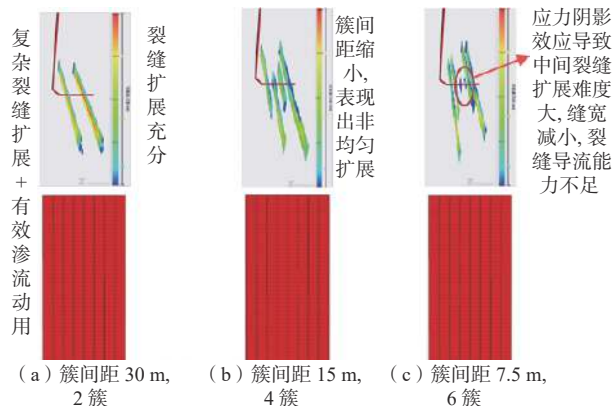


图5 不同簇间距裂缝扩展效果及渗流波及模拟结果  
Fig.5 Fracture propagation effect and seepage simulation with different cluster spacings

因此,基于长水平段细分切割压裂设计,考虑压裂效率及压裂成本,形成了以“多簇射孔密布缝+可溶座硬封隔+暂堵转向软分簇”为主体的高效体积压裂工艺<sup>[15-21]</sup>。考虑长7页岩油水平井水平段地应力(簇间应力差1~3 MPa)、岩石断裂韧性差异(2~4 MPa)及缝间扩展应力干扰,建议簇间距8~15 m,30~50 m长单段射孔3~5簇。

#### 3.2 多簇裂缝扩展控制技术

基于限流法压裂原理,实施段内簇间差异化射孔设计:低应力簇适度减少孔眼数量(最少3孔),高应力簇则适度增加孔眼数量(最多12孔)<sup>[22]</sup>。阶梯排量测试分析表明,差异化分簇射孔有效率可达到80%以上,较常规多簇射孔提高50%~60%<sup>[23]</sup>。以各簇均衡起裂为目的,进行了不同最小水平地应力条件下的裂缝模拟,优化形成了28~30 MPa(9孔)、25~28 MPa(7~8孔)、20~25 MPa(6孔),且单孔流量 $\geq 0.3 \text{ m}^3/\text{min}$ 的差异化限流射孔设计模式(见图6)。通过集成应用差异化限流射孔和动态暂堵转向多簇裂缝控制技术,进一步提升多簇起裂有效性和裂缝复杂程度。利用绳结暂堵剂或多粒径组合暂堵剂等可溶转向材料,其运移至已开启的射孔孔眼、裂缝缝口或缝端,产生封堵作用将裂缝转向至未起裂的高应力区域。根据压力响应特征判识暂堵有效性,当暂堵瞬时升压或暂堵前后工作压力差大于簇间应力差(3 MPa)时,裂缝转向至高应力区域产生新缝的概率较大。

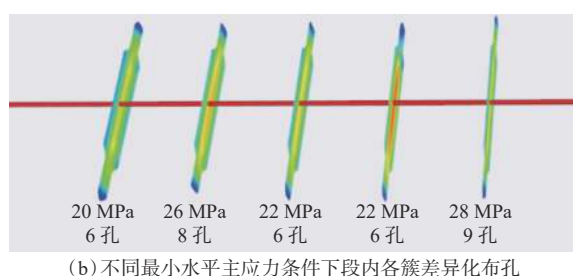
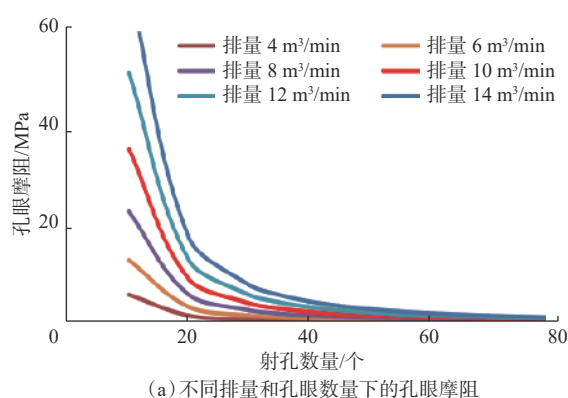


图 6 基于孔眼摩擦阻不同应力下差异化布孔裂缝模拟

Fig.6 Simulation results of differential hole layout for fractures under different stress conditions based on hole friction

### 3.3 压裂液与支撑剂优化

庆城页岩油水平井压裂主要采用变黏滑溜水体系,其功能以“低伤害、宜携砂、强渗吸、易混配”为主,结合储层及改造工艺差异性,通过开发功能单体实现压裂液多功能化。庆城页岩油水平井生产过程中结垢严重,从源头防垢出发,自主研发了防垢型压裂液,其在压裂时入井滞留于储层,随生产缓慢释放,实现“储层深部+裂缝+井筒”一体化防垢。庆城页岩油水平井压裂所用多功能滑溜水体系的性能:主剂形态为液态,减阻率(排量  $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ )不低于 70%,表观黏度  $3 \sim 60 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,黏弹性  $3.0 \text{ Pa}$ ,最高携砂浓度  $600 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,油相渗吸效率提高 30%,水相渗吸效率提高 15%,破胶液黏度不高于  $5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,90 min 破乳率 100%,采用在线混配方式配制,破胶剂加量 0.03%。

页岩油储层物性差,流体流动需要储层具有一定的导流能力。水力裂缝扩展特征及综合研究表明,页岩油储层体积压裂形成以水力主裂缝为主、支裂缝和微裂缝为辅的裂缝系统,不同级次裂缝的尺度差异大,主要包括长度和宽度。压裂模拟结果表明:一般主裂缝半长为井距一半( $200 \sim 250 \text{ m}$ ),宽度  $5 \sim 10 \text{ mm}$ ;支裂缝长度则不超过簇间距( $5 \sim 10 \text{ m}$ ),宽度为  $1 \sim 2 \text{ mm}$ ;微裂缝则更小,一般长度

小于  $1 \text{ m}$ ,宽度小于  $1 \text{ mm}$ 。利用无因次导流能力公式计算不同渗透率基质、不同尺度裂缝所需的导流能力<sup>[24]</sup>。主裂缝需要较高的导流能力( $\geq 5.0 \text{ D}\cdot\text{cm}$ ),支裂缝则需要一定的导流能力( $\geq 0.6 \text{ D}\cdot\text{cm}$ ),微缝仅需要较小的导流能力( $\geq 0.1 \text{ D}\cdot\text{cm}$ ),结果见图 7(a)。不同粒径石英砂不同铺置浓度条件下导流能力评价试验显示(图 7(b)),常规粒径石英砂组合可满足缝网不同尺度裂缝导流能力需求,前期采用 40/70 目、20/40 目石英砂组合作为支撑剂(前端为 40/70 目、后端为 20/40 目)。支撑剂运移铺置试验证实,支撑剂的粒径越小运移距离越远。为实现裂缝全尺度支撑,近年来支撑剂逐渐向 70/140 目、40/70 目等更小粒径石英砂组合拓展(前端为 70/140 目、后端为 40/70 目)。

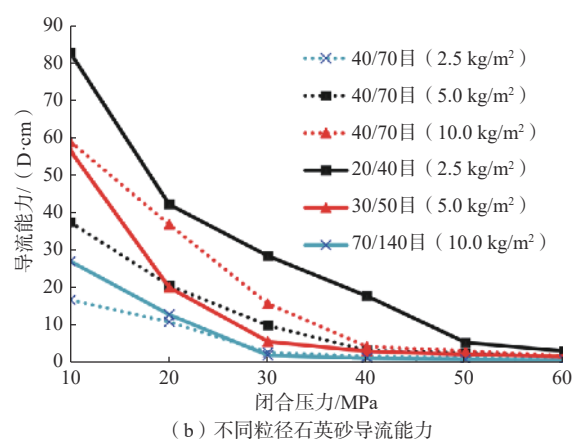
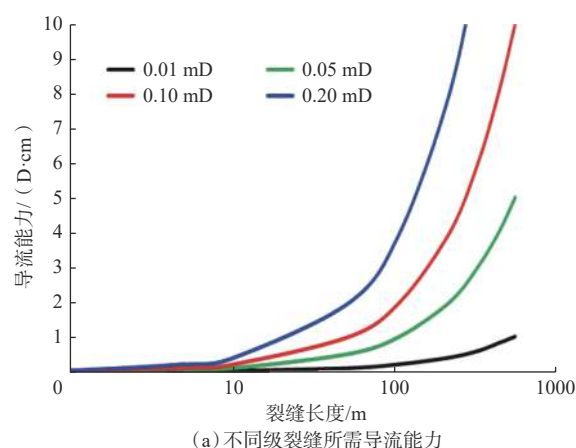


图 7 庆城页岩油裂缝导流能力需求及支撑剂导流能力评价

Fig.7 Demand for fracture flow conductivity and evaluation of proppant flow conductivity of Qingcheng shale oil

### 3.4 工程参数综合优化组合

以庆城页岩油矿场应用大数据为样本集,基于



210口井1年累计产油量,分析了百米油层1年累计产油量与百米油层压裂段数、百米油层压裂液用量、百米油层压裂加砂量和单段簇数的相关性<sup>[25]</sup>(见图8),发现产油量的主控工程因素是百米油层的压裂段数、压裂液用量、加砂量和单段簇数,影响程度

排序为百米油层的压裂段数、压裂液用量、加砂量和单段簇数。通过筛选高产井参数高值,综合优化工程参数范围界限组合:百米油层压裂2.5~3.0段,单段射孔3~6簇,加砂强度3.5~4.5 t/m,进液强度15~25 m<sup>3</sup>/m。

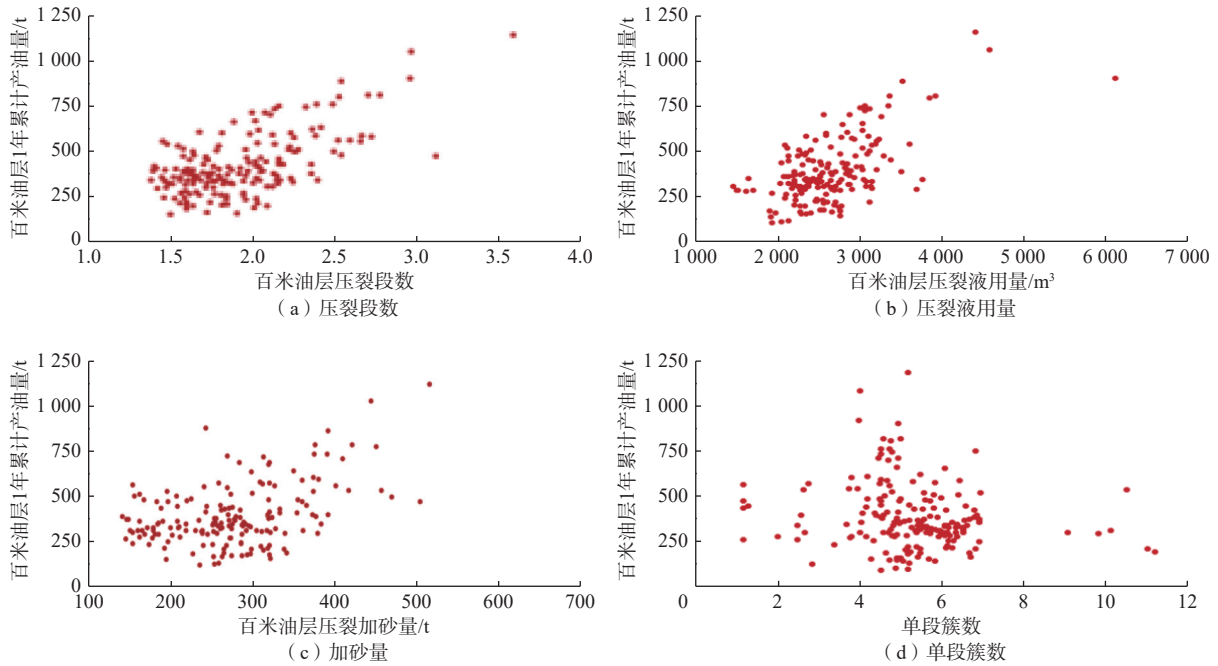


图8 压裂改造参数与每百米油层1年累计产油量的关系

Fig.8 Relationship between fracturing parameters and 1-year cumulative oil production of horizontal wells per 100 m

### 3.5 地质工程一体化精细压裂设计

非常规储层开发,提高单井产量的核心在于甜点精细刻画与压裂裂缝精准布放,关键在于地质工程一体化的压裂设计<sup>[26-27]</sup>。早期,设计页岩油水平井压裂方案时,主要基于测井曲线选点选段,结合三维地震给出优势段、潜力段、断层改造建议,并利用压裂模拟软件优化设计参数,各环节相互独立,

融合程度低,缺乏统一、可视、精细、高效的工作平台,并未实现真正的地质工程一体化设计(见图9)。

以HH6平台为例,引入Petrel三维平台,综合三维地震、地质、测井、岩石力学等资料,建立三维地质、油藏、地应力模型,进行该平台地质工程一体化压裂设计,确保优质储量控制最大化。裂缝模拟结果在三维油藏模型中精细可视,提升了压裂设计

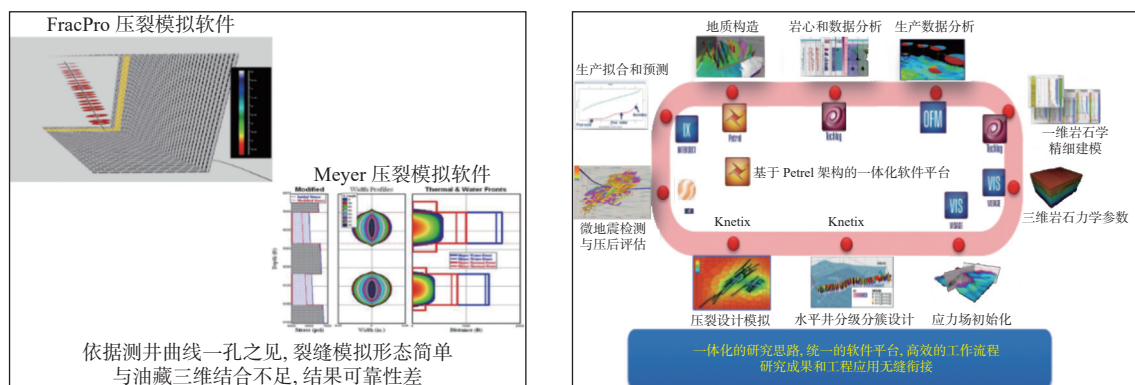


图9 地质工程一体化压裂设计平台与常规压裂软件对比

Fig.9 Comparison of geological engineering integration fracturing design platform and conventional fracturing software

与井网层间的适配性(见图 10)。同时基于分段压裂曲线进行裂缝反演,可获得多段多簇裂缝扩展形

态,进一步进行油藏模拟,可以对产量和动用范围进行预测、历史拟合和长期评价(见图 11)。

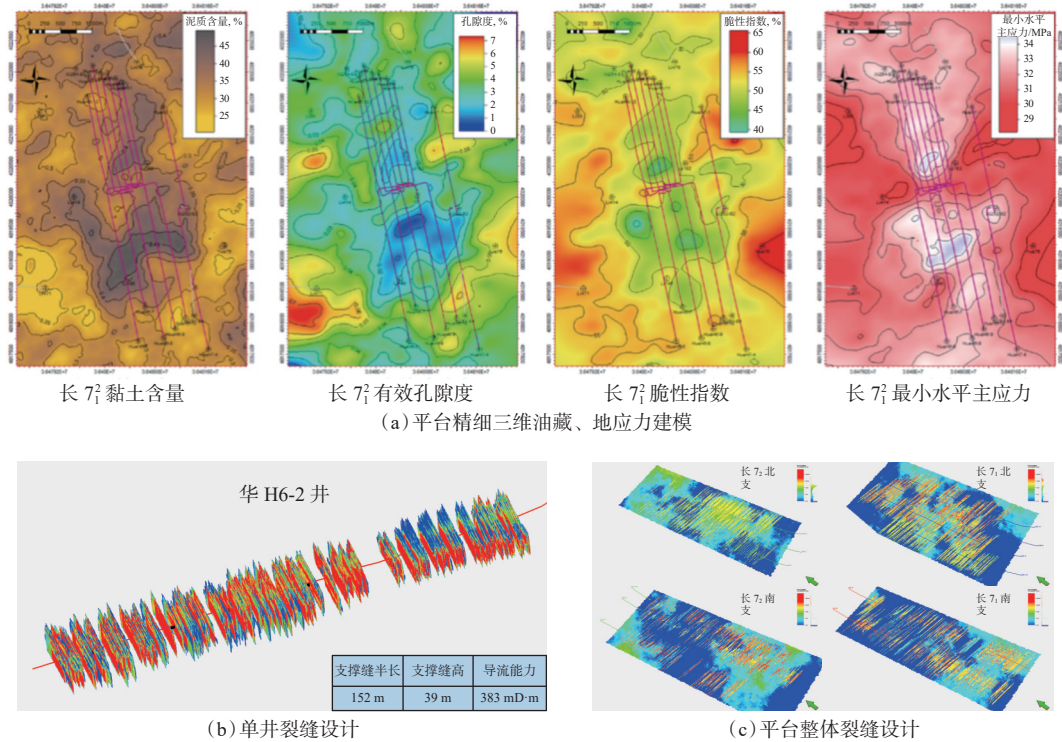


图 10 典型体积压裂平台 HH6 水平井裂缝设计

Fig.10 Horizontal well Fracture design of a typical volume fracturing platform HH6

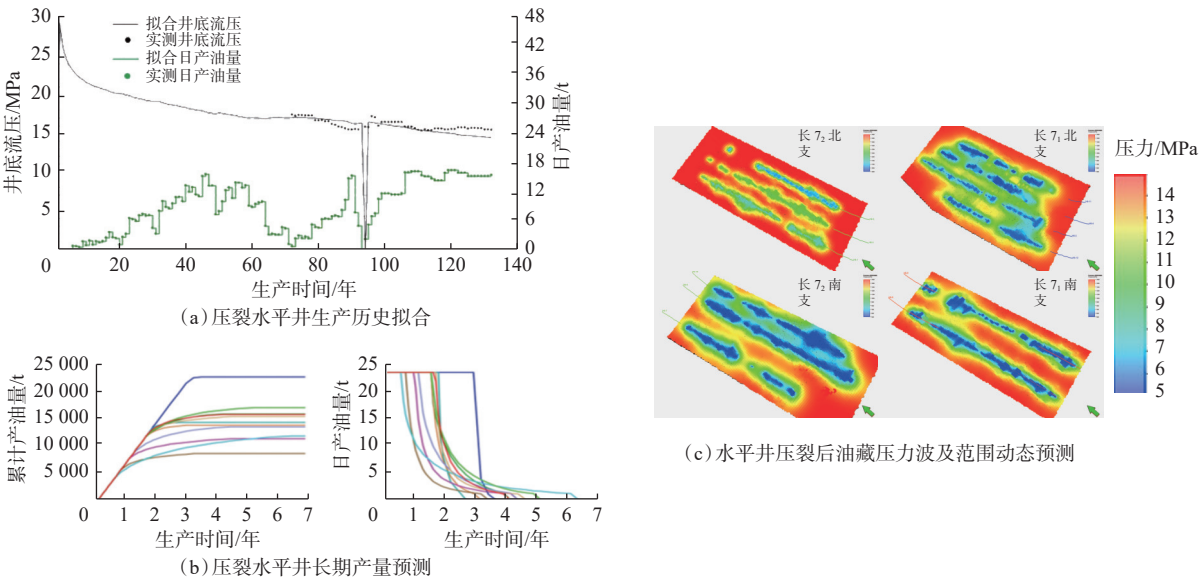


图 11 典型体积压裂平台 HH6 生产动态评价

Fig.11 Production Dynamic evaluation of a typical volume fracturing platform HH6

#### 4 现场应用效果

2018—2019 年,长庆油田首次在 HH6 平台开

展了地质工程一体化压裂技术试验,平台控制储量达  $166.9 \times 10^4$  t, 11 口水平井采用压裂整体控藏开发,井均单段 5.0 簇,加砂强度 4.1 t/m,进液强度  $21.8 \text{ m}^3/\text{m}$ 。投产后第 1 年产量递减率由前期的 40%~50% 降至



30%,第1年累计产油量达3 898 t。2022—2023年庆城页岩油区块的180口水平井应用地质工程一体化压裂技术压裂4 590段,水平井建模比例由2021年的4.7%提高至2022年的48.6%,2023年实现100%全覆盖。矿场大数据显示,2022年庆城页岩油单井初期产量达到14.5 t/d,2022年庆城页岩油总产量达到 $155 \times 10^4$  t。

## 5 结论与建议

1)采用大型物理模拟试验、微地震、取心观察方法,认识到庆城夹层型页岩油岩性以粉砂岩—细粉砂岩为主,水力裂缝以单一缝为主,辅以少量天然裂缝。采取大间距(>30 m)布缝、大排量压裂的改造模式不能实现裂缝对储层的有效控制,单井产量未取得有效突破(单井日产油<10 t/d)。

2)庆城页岩油储层非均质较强、渗透率低,储层压力、流体性质存在变化,天然裂缝、断层发育,采用地质工程一体化压裂技术实现了油藏与裂缝的精准匹配。

3)地质工程一体化压裂技术联合多专业协同优化压裂方案,基于油藏及力学参数三维建模,精细刻画甜点三维品质和天然裂缝及断层特征。在精细认识地质条件下,在参数设计、压裂液与支撑剂优选、差异化限流射孔及暂堵等方面形成了一整套地质工程一体化压裂方案优化方法。

4)目前庆城夹层型页岩油水力裂缝复杂程度仍然较低,提高水力裂缝复杂程度、提升裂缝控藏效果仍是后续单井增产的重点研究方向,后续将进一步进行利用天然裂缝的可行性研究。同时,对于庆城页岩油部分区域,需要进行上下注水叠合条件下精细裂缝纵向控制技术研究。

## 参考文献

### References

- [1] 邹才能,丁云宏,卢拥军,等.“人工油气藏”理论、技术及实践[J].石油勘探与开发,2017,44(1):144-154.  
ZOU Caineng, DING Yunhong, LU Yongjun, et al. Concept, technology and practice of “man-made reservoirs” development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 144-154.
- [2] 蒋廷学.非常规油气藏新一代体积压裂技术的几个关键问题探讨[J].石油钻探技术,2023,51(4):184-191.  
JIANG Tingxue. Discussion on several key issues of the new-generation network fracturing technologies for unconventional reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 184-191.
- [3] 张永平,齐士龙,唐鹏飞,等.松北致密气藏压裂裂缝扩展形态及压裂参数优化[J].石油钻采工艺,2022,44(5):623-631.  
ZHANG Yongping, QI Shilong, TANG Pengfei, et al. Optimization of fracture morphology and parameters in Songbei tight gas reservoir[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(5): 623-631.
- [4] 张矿生,唐梅荣,陶亮,等.庆城油田页岩油水平井压增渗一体化体积压裂技术[J].石油钻探技术,2022,50(2):9-15.  
ZHANG Kuangsheng, TANG Meirong, TAO Liang, et al. Horizontal well volumetric fracturing technology integrating fracturing, energy enhancement, and imbibition for shale oil in Qingcheng Oil-field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(2): 9-15.
- [5] 冯发勇,梁志彬,姚昌宇.东胜气田锦30井区变黏压裂液体积压裂技术[J].石油钻采工艺,2022,44(6):740-745.  
FENG Fayong, LIANG Zhibin, YAO Changyu. SRV-oriented fracturing with viscosity-variable fracturing fluids in the Jin-30 well district, Dongsheng gas field[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(6): 740-745.
- [6] 焦方正.页岩气“体积开发”理论认识、核心技术与实践[J].天然气工业,2019,39(5):1-14.  
JIAO Fangzheng. Theoretical insights, core technologies and practices concerning “volume development” of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(5): 1-14.
- [7] 吴奇,胥云,王晓泉,等.非常规油气藏体积改造技术:内涵、优化设计与实现[J].石油勘探与开发,2012,39(3):352-358.  
WU Qi, XU Yun, WANG Xiaoquan, et al. Volume fracturing technology of unconventional reservoirs: Connotation, optimization design and implementation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 352-358.
- [8] 付金华,牛小兵,谈卫东,等.鄂尔多斯盆地中生界延长组长7段页岩油地质特征及勘探开发进展[J].中国石油勘探,2019,24(5):601-614.  
FU Jinhua, NIU Xiaobing, DAN Weidong, et al. The geological characteristics and the progress on exploration and development of shale oil in Chang 7 Member of Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 601-614.
- [9] 李忠兴,屈雪峰,刘万涛,等.鄂尔多斯盆地长7段致密油合理开发方式探讨[J].石油勘探与开发,2015,42(2):217-221.  
LI Zhongxing, QU Xuefeng, LIU Wantao, et al. Development modes of Triassic Yanchang Formation Chang 7 Member tight oil in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 217-221.
- [10] 李松泉,吴志宇,王娟,等.长庆油田地质工程一体化智能决策系统开发与应用[J].中国石油勘探,2022,27(1):12-25.  
LI Songquan, WU Zhiyu, WANG Juan, et al. Development and application of geology and engineering integrated intelligent decision-making system of Changqing Oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 12-25.
- [11] 李树同,李士祥,刘江艳,等.鄂尔多斯盆地长7段纯泥页岩型页岩油研究中的若干问题与思考[J].天然气地球科学,2021,32(12):1785-1796.  
LI Shutong, LI Shixiang, LIU Jiangyan, et al. Some problems and thoughts on the study of pure shale-type shale oil in the 7th Member of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(12): 1785-1796.
- [12] 焦方正.陆相低压页岩油体积开发理论技术及实践:以鄂尔多斯

- 盆地长7段页岩油为例[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(6): 836–844.
- JIAO Fangzheng. Theoretical technologies and practices concerning “volume development” of low pressure continental shale oil: case study of shale oil in Chang 7 Member, Ordos Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(6): 836–844.
- [13] 赵金洲, 任岚, 沈骋, 等. 页岩气储层缝网压裂理论与技术研究新进展[J]. 天然气工业, 2018, 38(3): 1–14.
- ZHAO Jinzhou, REN Lan, SHEN Cheng, et al. Latest research progresses in network fracturing theories and technologies for shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(3): 1–14.
- [14] 王文东, 赵广渊, 苏玉亮, 等. 致密油藏体积压裂技术应用[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(3): 345–348.
- WANG Wendong, ZHAO Guangyuan, SU Yuliang, et al. Application of network fracturing technology to tight oil reservoirs[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(3): 345–348.
- [15] 慕立俊, 赵振峰, 李宪文, 等. 鄂尔多斯盆地页岩油水平井细切割体积压裂技术[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 626–635.
- MU Lijun, ZHAO Zhenfeng, LI Xianwen, et al. Fracturing technology of stimulated reservoir volume with subdivision cutting for shale oil horizontal wells in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 626–635.
- [16] 石道涵, 张矿生, 唐梅荣, 等. 长庆油田页岩油水平井体积压裂技术发展与应用[J]. 石油科技论坛, 2022, 41(3): 10–17.
- SHI Daohan, ZHANG Kuangsheng, TANG Meirong, et al. Development and application of shale oil horizontal well volume fracturing technology in Changqing Oilfield[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2022, 41(3): 10–17.
- [17] 赵振峰, 李楷, 赵鹏云, 等. 鄂尔多斯盆地页岩油体积压裂技术实践与发展建议[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(4): 85–91.
- ZHAO Zhenfeng, LI Kai, ZHAO Pengyun, et al. Practice and development suggestions for volumetric fracturing technology for shale oil in the Ordos Basin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 85–91.
- [18] 张矿生, 樊凤玲, 雷鑫. 致密砂岩与页岩压裂缝网形成能力对比评价[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(14): 185–189.
- ZHANG Kuangsheng, FAN Fengling, LEI Xin. Comparing evaluation of the ability of forming fracture network in tight sand reservoir and shale reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(14): 185–189.
- [19] 张矿生, 王文雄, 徐晨, 等. 体积压裂水平井增产潜力及产能影响因素分析[J]. 科学技术与工程, 2013, 21(35): 10475–10480.
- ZHANG Kuangsheng, WANG Wenxiong, XU Chen, et al. Analysis on stimulation potential and productivity influencing factors of network fractured horizontal well[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 21(35): 10475–10480.
- [20] 李宪文, 樊凤玲, 杨华, 等. 鄂尔多斯盆地低压致密油藏不同开发方式下的水平井体积压裂实践[J]. 钻采工艺, 2016, 39(3): 34–36.
- LI Xianwen, FAN Fengling, YANG Hua, et al. Volumetric fracturing technology of low-pressure tight oil reservoirs horizontal wells under different development conditions in Ordos Basin[J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(3): 34–36.
- [21] 陈超峰, 王波, 王佳, 等. 吉木萨尔页岩油下甜点二类区水平井压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(4): 112–117.
- CHEN Chaofeng, WANG Bo, WANG Jia, et al. Fracturing technologies of horizontal well in the second-class shale oil reservoirs of the lower sweet spot areas in Jimusaer[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 112–117.
- [22] WEDDLE P, GRIFFIN L, PEARSON C M. Mining the Bakken II: pushing the envelope with extreme limited entry perforating[R]. SPE 189880, 2018.
- [23] 翁定为, 雷群, 胥云, 等. 缝网压裂技术及其现场应用[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 280–284.
- WENG Dingwei, LEI Qun, XU Yun, et al. Network fracturing techniques and its application in the field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 280–284.
- [24] 卞晓冰, 蒋廷学, 贾长贵, 等. 考虑页岩裂缝长期导流能力的压裂水平井产量预测[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(5): 37–41.
- BIAN Xiaobing, JIANG Tingxue, JIA Changgui, et al. Production prediction of fractured horizontal well in shale gas reservoirs considering long-term flow conductivity[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5): 37–41.
- [25] 薛婷, 黄天镜, 成良丙, 等. 鄂尔多斯盆地庆城油田页岩油水平井产能主控因素及开发对策优化[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(12): 1880–1888.
- XUE Ting, HUANG Tianjing, CHENG Liangbing, et al. Dominating factors on shale oil horizontal well productivity and development strategies optimization in Qingcheng Oilfield, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(12): 1880–1888.
- [26] 范家伟, 袁野, 李绍华, 等. 塔里木盆地深层致密油藏地质工程一体化模拟技术[J]. 断块油气田, 2022, 29(2): 194–198.
- FAN Jiawei, YUAN Ye, LI Shaohua, et al. Geology-engineering integrated simulation technology of deep tight oil reservoir in Tarim Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(2): 194–198.
- [27] 蒋海, 肖阳, 王栋, 等. 页岩气体积改造人工缝网优化设计[J]. 特种油气藏, 2022, 29(5): 154–160.
- JIANG Hai, XIAO Yang, WANG Dong, et al. Optimal design of artificial fracture network for shale gas volume stimulation[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(5): 154–160.

[编辑 刘文臣]