

引用: 谢贵琪, 林海, 刘世铎, 等. 柴达木盆地西部英雄岭页岩油地质工程一体化压裂技术创新与实践[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(4): 105-116.

Xie Guiqi, Lin Hai, Liu Shiduo, et al. Innovation and practice of geology and engineering integrated fracturing technology for shale oil in Yingxiongling area in the western Qaidam Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(4): 105-116.

柴达木盆地西部英雄岭页岩油地质工程 一体化压裂技术创新与实践

谢贵琪¹ 林海¹ 刘世铎¹ 刘永¹ 万有余¹ 张成娟¹ 李亚锋² 崔荣龙³ 雷丰宇¹
隋国杰¹ 邓立本² 张涛² 刘欢¹ 刘云翼⁴ 蒲永霞²

(1 中国石油青海油田公司钻采工艺研究院; 2 中国石油青海油田公司勘探开发研究院; 3 中国石油青海油田公司采油三厂;
4 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院)

摘要: 柴达木盆地英雄岭下干柴沟组页岩层系灰云岩、泥页岩发育良好, 灰云坪有利储层与优质烃源岩叠置互层分布, 页岩油资源勘探开发潜力巨大, 但具有高应力、高应力差、高频沉积旋回、纵向层理发育、强非均质性、储层改造难点, 亟须建立适用性强的压裂技术体系, 支撑效益勘探与高效开发。通过开展地质力学实验, 明确了页岩破裂与裂缝延伸规律, 制定了“控近扩远”的改造思路; 发展了一维地质力学与可压裂性新算法, 建立三维精细地质力学模型; 采用模型模拟优化与数据驱动优化相结合的方式, 形成了直井缝网压裂参数模板; 对标国内陆相页岩油体积压裂主流做法与关键参数, 在段簇设置、压裂参数优化等方面践行地质工程一体化理念, 实现了以“加密切割、极限限流射孔、大排量、大规模、滑溜水高强度连续加砂、逆复合控近扩远、高石英砂占比”为核心的体积压裂技术的升级换代。实施直井压裂 37 井次, 日产油 2.1~44.9m³, 获工业油流占比达 97.2%; 水平井压裂 6 井次, 最高日产油 113.5m³, 在下干柴沟组上段落实页岩油地质储量 5×10⁸t。

关键词: 柴达木盆地; 英雄岭; 下干柴沟组; 页岩油; 地质工程一体化; 压裂技术; 方案优化

中图分类号: TE357.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2023.04.010

Innovation and practice of geology and engineering integrated fracturing technology for shale oil in Yingxiongling area in the western Qaidam Basin

Xie Guiqi¹, Lin Hai¹, Liu Shiduo¹, Liu Yong¹, Wan Youyu¹, Zhang Chengjuan¹, Li Yafeng², Cui Ronglong³, Lei Fengyu¹,
Sui Guojie¹, Deng Liben², Zhang Tao², Liu Huan¹, Liu Yunyi⁴, Pu Yongxia²

(1 Drilling and Production Technology Research Institute, PetroChina Qinghai Oilfield Company; 2 Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Qinghai Oilfield Company; 3 No.3 Oil Production Plant, PetroChina Qinghai Oilfield Company; 4 Unconventional Petroleum Research Institute, China University of Petroleum (Beijing))

Abstract: The limy dolomite and shale are well developed in Lower Ganchaigou Formation shale series in Yingxiongling area in Qaidam Basin, and the favorable reservoirs of limy-dolomitic flat are superimposed and interbedded with high-quality source rocks, showing huge exploration and development potential of shale oil resources. However, there are some difficulties in reservoir reconstruction, such as high field stress, high stress difference, high-frequency sedimentary cycle, well-developed lamination in vertical direction, and strong reservoir heterogeneity. Therefore, it is urgent to develop a highly applicable and high-efficiency fracturing technology system to support the benefit exploration and high-efficiency development. By conducting geomechanical experiments, the law of shale rupture and fracture propagation is clarified, and the reservoir reconstruction idea of “controlling nearby fractures and propagating long fractures” is formulated; A new algorithm

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司“十四五”前瞻性项目“柴达木盆地页岩油勘探开发理论与关键技术研究”(2021DJ1808); 中国石油天然气股份有限公司油气和新能源分公司科技项目“水平井分段压裂体积改造技术 V2.0 现场试验”(2022ZS0610)。

第一作者简介: 谢贵琪(1993-), 男, 重庆人, 学士, 2017年毕业于中国石油大学(北京)石油工程专业, 工程师, 现主要从事油气藏增产改造工作。地址: 甘肃省敦煌市七里镇青海油田钻采工艺研究院, 邮政编码: 736200。E-mail: xgqzcqh@petrochina.com.cn

收稿日期: 2023-05-30; 修改日期: 2023-07-05

of 1D geomechanics and fracability is researched, and a 3D fine geomechanical model is established; The combination of model simulation optimization and data-driven optimization is applied to form a network fracturing technology template for vertical wells; By benchmarking the mainstream practices and key parameters of volume fracturing of continental shale oil in China, the concept of geology and engineering integration is implemented in cluster setting and fracturing parameters optimization, achieving the upgrade of volume fracturing technology with the core of "high-density cutting, extremely limiting flow perforation, large displacement, large scale, high-intensity and continuous slickwater sand addition, inverse composite 'controlling nearby fractures and propagating long fractures', and high quartz sand percentage". A total of 37 fracturing operations were conducted in vertical wells, with an oil rate of 2.1-44.9 m³/d, and the wells with commercial oil flows accounted for 97.2%; Another six fracturing operations were conducted in horizontal wells, with the maximum oil rate of 113.5 m³/d, and the proven shale oil geological reserves of 5×10⁸t in the upper member of Lower Ganchaigou Formation.

Key words: Qaidam Basin, Yingxiongling, Lower Ganchaigou Formation, shale oil, geology and engineering integration, fracturing technology, scheme optimization

0 引言

近年来,随着石油与天然气基础研究的进步与工程技术的发展,页岩油逐渐成为继页岩气后又一非常规资源勘探的热点领域^[1]。多轮次油气资源评估结果表明,中国页岩油资源储量丰富,主要分布在鄂尔多斯、准噶尔、松辽和四川等盆地,技术可采资源量已达 200×10⁸t^[2];同时随着体积压裂技术的创新发展与推广应用,页岩油资源的勘探范围、可动用资源量正在快速增加^[3-4]。

柴达木盆地英雄岭地区的勘探工作始于 20 世纪 50 年代,历经了从浅层到深层、从碎屑岩到碳酸盐岩、从常规到非常规 3 个阶段。自 2019 年起,逐步勘探发现了古近系页岩油资源。英雄岭地区古近系下干柴沟组上段(E₃)分布广、地层完整,其 IV~VI 油层组灰云岩、泥页岩发育良好,在平面上灰云坪有利储层分布稳定,与优质烃源岩叠置互层分布,页岩油勘探潜力巨大^[5-7],是重要的储量接替方向,但是,英雄岭地区页岩层系地质工程条件复杂、缺乏针对性的基础研究和页岩油改造经验。本文以英雄岭页岩油勘探开发一体化进程中多井型压裂改造需求为研究背景,通过分析改造难点,开展配套基础实验研究,确定了直井缝网压裂和水平井体积压裂两条主体技术路线;通过现场试验,加强提速提效关键技术的探索和攻关,形成了适合英雄岭页岩油特点的地质工程一体化压裂技术体系。

1 地质特征与勘探现状

柴达木盆地英雄岭构造带位于柴达木盆地西部地区,为喜马拉雅晚期隆起带,地面以风蚀山地为主,沟壑纵横,海拔为 3000~3900m。该区现今整体为一断鼻构造,地层稳定,表现为向盆地腹部倾斜的宽缓斜坡(图 1),主要发育下油砂山组、上干柴沟组、

下干柴沟组上段、下干柴沟组下段、路乐河组 5 套地层,其中古近系下干柴沟组上段沉积时期,英雄岭整体为大型凹陷,发育浅湖—深湖相沉积,形成大面积分布的咸化湖相页岩,页岩油主要分布在下干柴沟组上段 IV~VI 油层组,厚度为 1000~1300m,划分为 23 个箱体(图 2),是盆地内页岩油勘探开发的优势目标区。

英雄岭地区下干柴沟组上段页岩有机碳含量多为 0.4%~2.7%,平均为 1%,生烃潜量一般为 1~40mg/g,平均为 14mg/g,发育水生藻类和细菌双生烃母质,原始生产力高,存在低熟—高熟的“两段式”生烃模式。纵向上识别出 7 套有效烃源岩段(TOC>0.4%),厚度为 600~680m(占地层厚度 56%),分布面积为 1370km²,主体处于生油窗,具备良好的生烃潜力,估算页岩油资源量达到 21×10⁸t。下干柴沟组上段沉积时期,英雄岭地区为咸化湖盆沉积,主要形成纹层状灰云岩、纹层状云灰岩、纹层状黏土质页岩、薄层状灰云岩、薄层状云灰岩、薄层状泥岩 6 种岩相,纵向上呈互层发育,其中纹层状灰云岩和薄层状灰云岩为最佳储层岩相,薄层状灰云岩孔隙度最高(孔隙度大于 5%的占比超过 40%),纹层状灰云岩渗透率最高(渗透率大于 0.1mD 的占比超过 45%)。储集空间发育晶间孔、纹层缝等 5 种类型孔缝,三维连通性好,SEM 与薄片揭示储集空间以白云石晶间孔为主,孔径主体为 100~3000nm,孔喉配位数为 1.8,纹层缝可有效提高渗流能力;岩心孔隙度为 3.04%~7.12%、平均为 5.1%,渗透率为 0.01~18.46mD、平均为 0.24mD,储层特征整体以低孔、特低渗为主。

英雄岭地区下干柴沟组上段勘探初期(1977—2009 年),以“碳酸盐岩裂缝性油藏、构造—断裂控储”为主要思路,采用“占高点、沿断裂、打裂缝”的模式进行含油气潜力评价,改造方式以酸化为

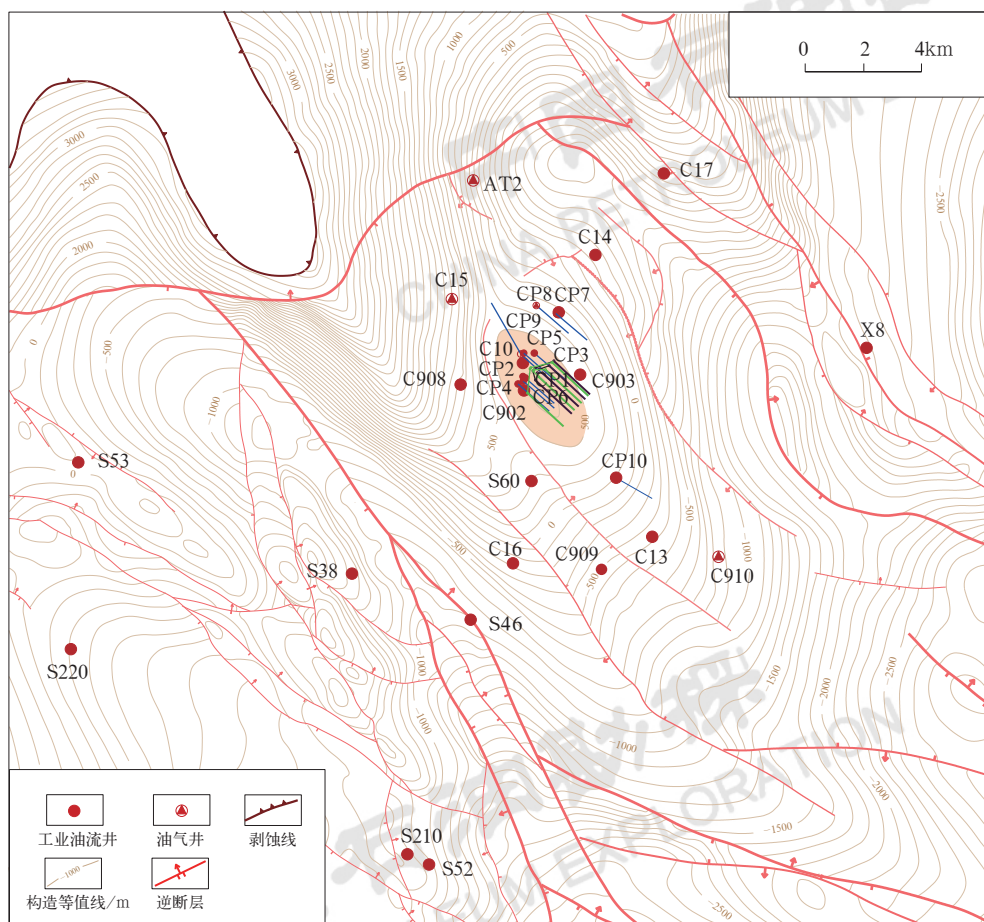


图1 英雄岭地区下干柴沟组上段IV油层组7小层顶面构造图

Fig.1 Top structural map of No.7 thin layer of IV oil group of the upper member of Lower Ganchaigou Formation in Yingxiongling area

主,配合多级酸压进行裂缝清洗和基质酸化,期间个别井获得高产工业油气流,但由于储层类型与成藏因素认识不清,整体勘探成功率较低,是“有井无田,难以扩展”的时期。2010—2020年,随着“孔—洞—缝复合控储”的认识和致密油开发理念的提出,储层改造工艺转而采用“滑溜水打破储层、冻胶连续携砂”的双重介质碳酸盐岩储层缝网压裂技术,直井施工排量为 $6\sim 8\text{m}^3/\text{min}$,液量为 800m^3 ,砂量为 $60\sim 70\text{m}^3$;同时开始探索水平井开发模式,施工排量为 $8\sim 12\text{m}^3/\text{min}$,用液强度为 $15\sim 20\text{m}^3/\text{m}$,加砂强度为 $1.9\sim 2.3\text{t}/\text{m}$,整个过程在平面上找出了多个富集区,发现了规模储量。2020年,随着C9井取得突破,发现了下干柴沟组上段页岩油富集区,揭开了页岩油勘探的序幕。2021年起,结合英雄岭地区的实际情况,提出了巨厚山地式页岩油概念,开始进行“直井+水平井”立体勘探,储层改造思路转变为“控近扩远,体积改造”,规模参数进一步放大,发展配套变黏滑溜水、加密切割、极限限流射孔等

关键技术,形成了页岩油压裂主体工艺,在C902、CP1等井取得重大油气发现,英雄岭页岩油迈进战略突破阶段。

2 地质工程一体化压裂技术进展

2.1 压裂改造技术难点

(1) 地应力高、水平应力差大、非均质性强。在东昆仑山和阿尔金山两个走滑断裂带的控制下,英雄岭地区构造变形主要为挤压变形,属于地应力集中区带,构造应力表现为北东—南西向的挤压。根据已压裂井施工数据计算,英雄岭页岩地层破裂压力梯度为 $0.0226\sim 0.0295\text{MPa}/\text{m}$,平均为 $0.0254\text{MPa}/\text{m}$,应力梯度较高,较国内其他页岩储层高出 $20\%\sim 30\%$,压裂改造施工过程中人工裂缝扩展阻力更大,施工质量及安全携砂的难度增大;同时,水平应力差较大,整体在 $11\sim 20\text{MPa}$ 之间,压裂人工裂缝需要将净压力提高到较高水平,才能实现体积压裂^[8-9],因此对

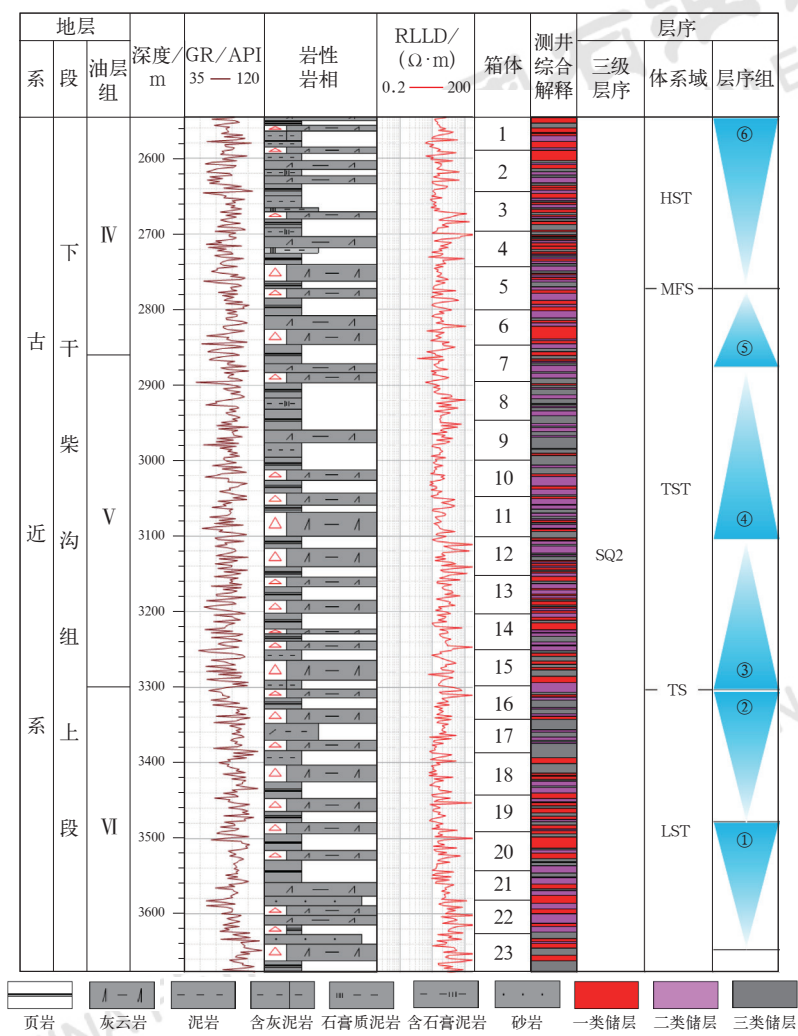


图 2 英雄岭地区页岩地层旋回特征与箱体划分综合图

Fig.2 Comprehensive column of sedimentary cycle characteristics and box division of shale series in Yingxiongling area

措施液降阻率、施工排量提出了更高要求。在阿尔金断裂左旋走滑和盆地晚期近南北向挤压构造应力的双重影响下，英雄岭构造带内部呈现出反“S”形复杂构造形态，形成空间差异显著的复合形变组合构造形变分区，在空间上带来了强非均质性；从岩心微观和宏观实验印证，英雄岭页岩储层岩性的非均质性强，岩石力学性质、原油可动性的差异性较大，对有效动用页岩油资源提出了更高的要求，需要尽可能地实现缝网的全覆盖和均衡改造^[8-13]，建立页岩油渗流通道，提高页岩油渗流能力。

(2) 高频沉积旋回控制，纵向层（纹）理发育。英雄岭下干柴沟组上段Ⅳ～Ⅵ油层组的厚度为1000～1300m，发育一个三级层序，可划分为6个准层序组（图2）、59个高频沉积旋回；高频沉积旋回的发育特征使得三维地质力学建模与水力裂缝扩展规律探

索的难度增大。下干柴沟组上段在沉积时期位于湖盆沉积中心，构造稳定宽缓，页岩纵向纹层与层理发育，压裂改造时容易沟通水平层理与天然微裂隙，裂缝高度延伸受限，从而影响整体裂缝网络的尺寸，因此需要采取“控近扩远”的压裂思路，在压裂初期使用高黏措施液充分突破层理面后，再采用低黏措施液进行体积压裂^[14-17]，实现改造体积的最大化。

围绕英雄岭页岩油地质特征与改造难点，2021—2022年按照“勘探开发一体、直井水平井并进”的思路，从探评直井扩面落实纵向开发目标、直井多层“分压合试”建立高效试油模式、水平井单井提产落实箱体产能、开发试验平台探索效益开发方法4个层次开展工作，明确地质工程一体化主体理念^[18-25]，形成适配性强的改造技术。

2.2 地质力学实验与模型建立

2.2.1 地质力学实验评价

英雄岭页岩具有层理发育、非均质性强的特点,因此结合波速各向异性、应力敏感、常规压缩实验、声发射测试、划痕测试等实验,建立了一套地质力学实验方法。实验结果表明,英雄岭地区下干柴沟组上段平均杨氏模量为38.74GPa、泊松比为0.26、最大水平主应力为78.5MPa、最小水平主应力为62.9MPa、水平应力差为15.2MPa,纹层状岩相的

各向异性相对较大、其沿层理排列的微裂隙更为发育。整体表现出纹层状灰云岩和薄层状灰云岩均易形成复杂裂缝,其中纹层状岩相的强度更低、破裂形成的裂缝更复杂,纹层和层理对裂缝形态的控制作用显著,裂缝的纵向延伸难度较大。

2.2.2 可压裂性量化评价

基于地质力学实验的评价结果和测井数据,建立一维地质力学参数和可压裂性量化计算模型,其中可压裂性量化模型主要包含页岩基质脆性、水平应力差异系数、天然微裂隙发育指数和综合可压裂性指数(表1)。

表1 英雄岭页岩油可压裂性量化评价指标与标准表

Table 1 Quantitative evaluation indicators and standards of shale oil fracability in Yingxiongling area

评价项目	评价指标与计算公式	评价标准		
		I类	II类	III类
页岩基质脆性	$B_{Brit} = 0.5 \times \{[(E-10)/(-50)] + [(\mu-0.4)/(-0.3)]\}$ $B = \frac{w_{石英} + w_{长石} + w_{碳酸盐}}{w_{总}}$ $BI = \frac{B_{Brit} + B}{2}$	> 0.6	0.4 ~ 0.6	< 0.4
水平应力差异系数	$K_h = 1 - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{\sigma_H}$	> 0.7	0.3 ~ 0.7	< 0.3
天然微裂隙发育指数	$\frac{K_0}{K} = 1 + \rho_c \frac{h}{1 - 2\mu_0} (1 - \frac{\mu_0}{2})$ $h = \frac{8(1 - \mu_0^2)}{3(1 - \frac{\mu_0}{2})}$ $K = \frac{E}{3(1 - \mu)}$	> 0.25	0.1 ~ 0.25	< 0.1
综合可压裂性指数	$FI = \frac{1}{3} \times BI + \frac{1}{3} \times K_h + \frac{1}{3} \times \rho_c$	> 0.6	0.4 ~ 0.6	< 0.4

注: B_{Brit} —模量脆性; E —杨氏模量, GPa; μ —泊松比; μ_0 —最大泊松比; B —矿物法脆性; $w_{石英}$ —岩石中石英含量, %; $w_{长石}$ —岩石中长石含量, %; $w_{碳酸盐}$ —岩石中碳酸盐矿物含量, %; $w_{总}$ —岩石中黏土矿物与脆性矿物含量, %; BI —页岩基质脆性; K_h —水平应力差异系数; σ_H —最大水平主应力, MPa; σ_h —最小水平主应力, MPa; K —体积模量, GPa; K_0 —最大体积模量, GPa; ρ_c —天然微裂隙发育指数; h —微裂隙密度系数; FI —综合可压裂性指数。

英雄岭页岩储层可压裂性量化评价结果表明,其基质脆性为0.5~0.7,整体脆性较好;水平应力差异系数中等偏小,平均为0.21;天然微裂隙发育指数适中,平均为0.14;整体综合可压裂性较好,大规模改造具备形成复杂缝网的条件。

2.2.3 三维地质力学建模

在完成一维地质力学计算后,结合三维地质模型,通过精度迭代提升,将一维地质力学剖面融入压力系统与靶体分布,建立精细三维地质力学模型(图3),迭代模型深度误差小于5m,层位归位误差小于0.5m。基于三维地质力学模型,可进一步开展人工缝网延伸

形态与地应力场耦合模拟,为单井压裂方案中立体布缝、应力干扰、拉链式施工次序、产能预测等内容提供研究平台。

2.3 页岩油直井缝网压裂与高效测试技术

在直井试油改造缝网压裂技术方面,采用传统的地质工程一体化研究思路,从岩性、物性、油气显示、测井解释等方面建立压裂模型进行模拟优化。同时,结合现场试验情况,历经“保障成功、提高规模、回归效益”3个阶段,形成了以“控近扩远、体积改造”为主体的页岩油直井缝网压裂技术。根据前期探评井

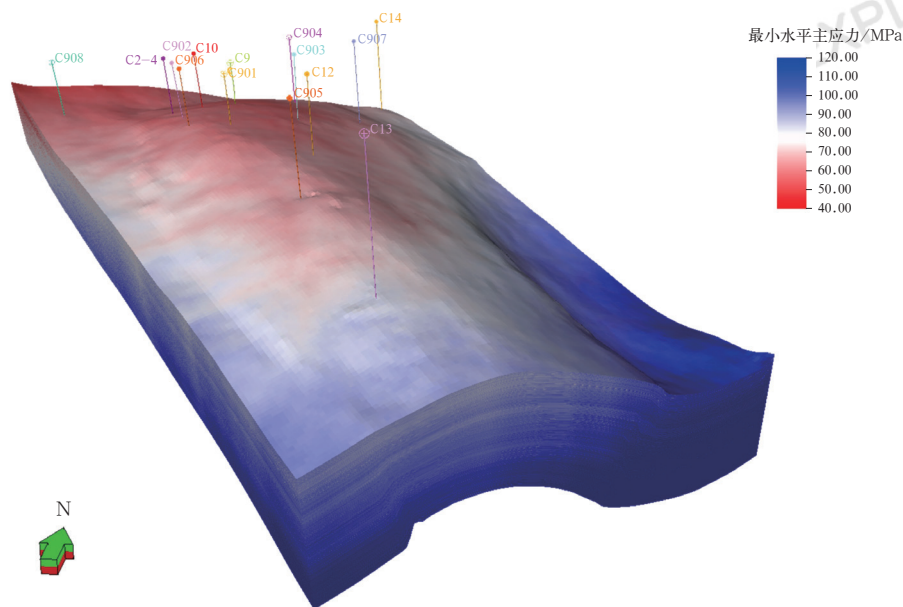


图3 英雄岭页岩储层三维地质力学模型

Fig.3 3D geomechanical model of shale reservoir in Yingxiongling area

的现场试验结果,进行了地质、工程整体的主控因素分析,明确了加砂强度、用液强度、施工排量这3项压裂关键参数,创新采用BP神经网络学习方法,建立英雄岭页岩油产能预测模型,尝试从数据驱动的角度,进行压裂参数优化。通过以3mm油嘴生产制度下最高日产油量作为输出变量,对加砂强度、用液强度、施工排量进行3个批次的学习、调整,最终形成了英雄岭页岩油直井缝网压裂参数的模板:最优施工排量为 $14\text{m}^3/\text{min}$ 、最优用液强度为 $150\sim 160\text{m}^3/\text{m}$ 、最优加砂强度为 $10\text{m}^3/\text{m}$,并逐步由模型驱动转为模型—数据双驱动优化压裂参数,完成了压裂参数控制与生产效果最大化的协调统一。

在英雄岭页岩油扩大勘探评价过程中,提速提效成为迫切的生产需求,采用传统“单层试油—改造—上返”模式,试油周期长、作业工序复杂、管柱摩擦高、压裂规模受限等问题突出。针对英雄岭页岩储层厚度大、箱体多的特点,通过井身结构逆向设计、差异化改造方案优化、极限限流射孔优化、生产监测配套技术优选,完成可溶桥塞套管分段压裂技术由水平井向勘探试油直井推广的可行性论证与先导性试验。利用可溶桥塞分层确保每个试油层能够根据其储层特征差异化设计改造参数、实现精准改造,并发挥套管压裂时更低的沿程摩阻优势,进一步增大人工裂缝净压力,提高改造程度;同时,采用桥射—压裂联作的模式,快速实现多试油层分层一次改造,配合

示踪剂及光纤测井等技术,完成各试油层生产情况的监测,最终形成多试油层“改造试油一步到位”的提质增效技术。

现场实施直井压裂改造37井次,压后日产油 $2.1\sim 44.9\text{m}^3$,进一步明确了英雄岭下干柴沟组上段页岩层系整体富油。在进入勘探开发一体化阶段后,试验了3井次18层段直井可溶桥塞套管分段压裂技术,施工排量达到了 $14\text{m}^3/\text{min}$,平均单层液量为 1258.2m^3 、砂量为 98m^3 ,并配套使用裂缝监测、示踪剂、分布式光纤测产液剖面等技术,成功实现了“一次集中压裂8层组、一天压裂2层组”的提速目标,展现出良好的适用性与可操作性,综合提高了裂缝净压力45%和试油效率70%~80%,初步建立了纵向多箱体条件下“分层压裂、高效试油”技术模式。

2.4 页岩油水平井体积压裂技术

基于英雄岭页岩储层裂缝破裂延伸机理的研究结论和“高应力、高应力差、高频沉积旋回、纵向层理发育”的改造难点,逐步探索完善建立了包括地质因素和工程因素在内的统一工作平台,地质工程一体化研究,开展段簇优选、裂缝形态调控模拟、规模参数优化等研究,形成了页岩油水平井地质工程一体化技术系列(图4)。

通过不断开展现场试验与调整实施,形成了加密切割(段间距为 $45\sim 50\text{m}$ 、簇间距为 $6\sim 9\text{m}$)、

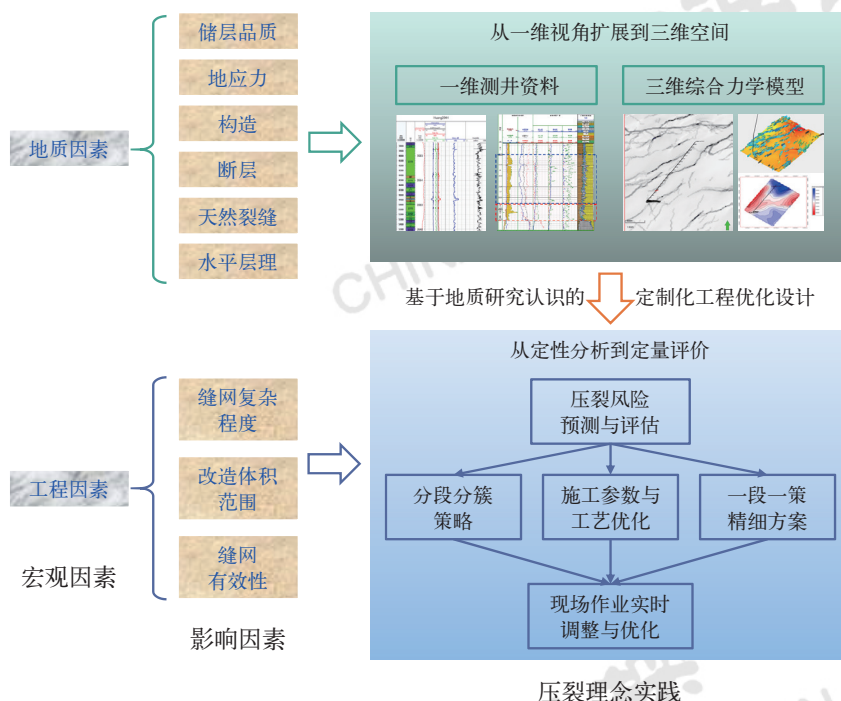


图4 英雄岭页岩油水平井地质工程一体化压裂技术

Fig.4 Geology and engineering integrated fracturing technology for shale oil in horizontal well in Yingxiongling area

极限限流射孔（单段射孔数为30~40个）、大排量快速提升（ $18\text{m}^3/\text{min}$ ）、大规模（用液强度为 $35\sim 38\text{m}^3/\text{m}$ ）、滑溜水高强度连续加砂（加砂强度为 $4.8\sim 5.6\text{t}/\text{m}$ ）、逆复合控近扩远、高石英砂占比（达到90%）的柴达木特色页岩油水平井体积压裂技术，实现了改造体积和单井EUR的最大化。

为了解决勘探开发一体化进程推进中出现的整体动用、效益开发的问题，在采用水平井体积压裂的模式落实了英雄岭页岩油纵向各甜点箱体含油性后，围绕上甜点5号、6号箱体部署了YS1H立体开发先导性试验平台。以“纵向上多层叠置布井，交错立体布缝”为核心设计思路，开展裂缝立体扩展、应力干扰、拉链式压裂次序优化等平台井立体改造关键内容的研究；同时，为进一步实现降本增效、最优井网匹配关系，开展了不同参数规模、不同液体体系、大段多簇暂堵转向等试验。通过先导性试验平台的实施，推进了页岩油水平井体积压裂技术与大平台立体开发模式深度融合，促进了压裂主体工艺从单井设计、井丛整体设计向立体开发井网设计的思路扩展。

2021年10月，针对直井试油情况较好的5号箱体部署英雄岭页岩油第一口水平井——CP1井，压裂改造取得良好效果。该井压裂施工排量为 $18\text{m}^3/\text{min}$ ，总液量为 34677m^3 ，用液强度为 $34\text{m}^3/\text{m}$ ，总砂量为

3301m^3 ，加砂强度为 $3.3\text{m}^3/\text{m}$ ，平均破裂压力达到 74.2MPa ，平均停泵压力为 51.6MPa ，平均砂比为22.5%；创下当时柴达木盆地水平井压裂施工“施工排量最大、簇间距最短、用液强度最大、加砂强度最大”等纪录。

CP1井焖井19天后开井生产（图5），试油阶段井口压力较为稳定（由 33MPa 下降到 26.7MPa ），最高日产油 113.5m^3 （4mm油嘴自喷，综合含水率为33.6%）；试采阶段，日产液平均为 79.2m^3 ，日产油平均为 39.6t ，257天累计产油 11042t 。通过CP1井体积压裂试验，进一步证实了英雄岭页岩油水平井体积压裂技术释放生产潜力的可行性和高效性。同时，围绕CP1井落实的上甜点箱体，进一步实施了YS1H立体开发先导性试验平台，该平台共在5号、6号箱体部署8口井、实施7口井162段体积压裂，平均簇间距为 6.77m 、排量为 $18\text{m}^3/\text{min}$ 、破裂压力为 75.8MPa 、停泵压力为 46MPa 、平均用液强度为 $30.74\text{m}^3/\text{m}$ 、加砂强度为 $5.07\text{t}/\text{m}$ 。截至2023年4月30日，返排率为11%~20%，7口井日产油平均为 35t 。通过压裂数据在三维地应力模型中的耦合反演（图6），发现加密井距（200m）的YS1H6-3井和YS1H6-4井较其他井距（300m）的YS1H6-1井和YS1H6-2井相比，应力干扰明显，后续立体压裂试验将以最优井网、井距作为重点评价内容。

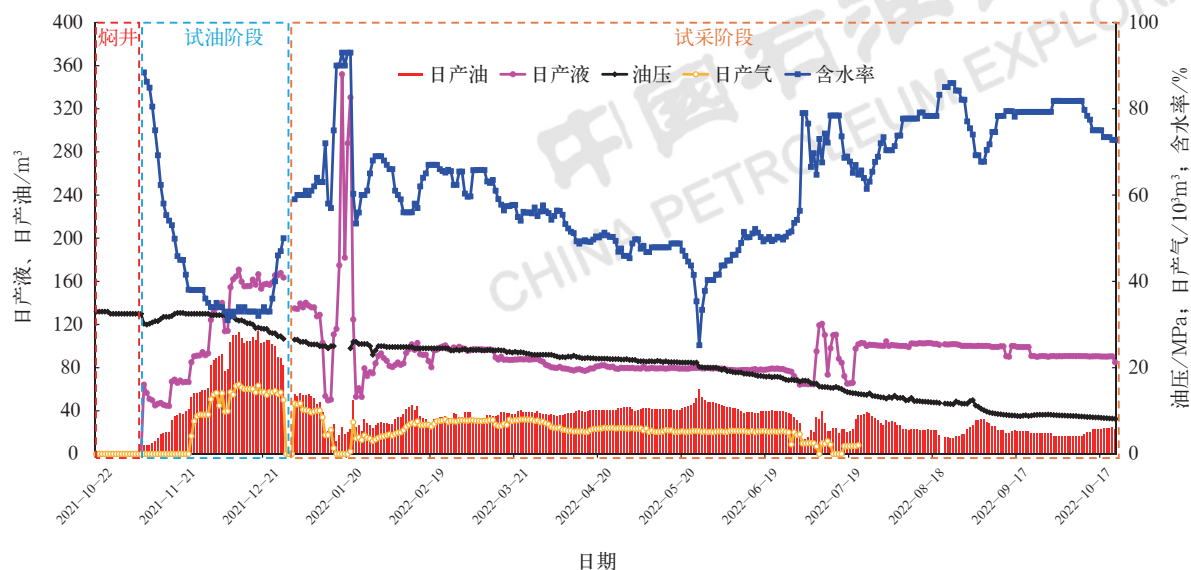


图5 CP1井压后焖井及试油、试采阶段生产曲线图

Fig.5 Production curves of well soak, well test and production test after fracturing of Well CP1

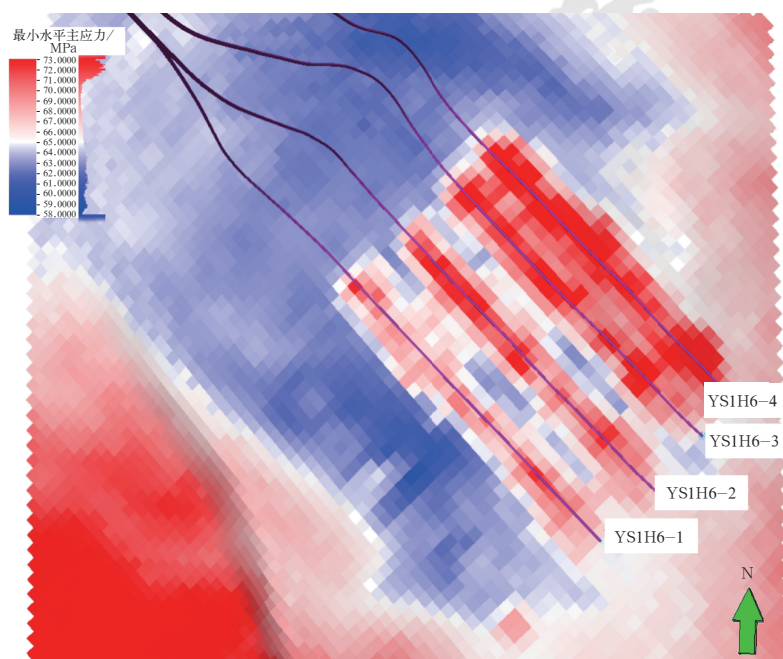


图6 YS1H平台井人工裂缝与地应力场耦合反演图(6号箱体)

Fig.6 Coupling inversion of artificial fractures and stress field on YS1H platform (No.6 box)

2022年,进一步部署钻探了CP2井等5口井,整体沿用CP1井的技术模式进行压裂优化设计与施工,突破了以14号、15号箱体为代表的中甜点,其中CP2井、CP4井压后最高日产油分别为84m³、47.9m³,并均形成了稳定产能。通过该批井实施,扩大了英雄岭页岩油平面建产范围,扩展了纵向箱体的水平井开发新认识。

2.5 压裂返排液回用技术

柴达木盆地地面环境复杂,社会依托薄弱,水资

源匮乏,水资源的巨大消耗一定程度制约着体积压裂实施过程中施工效率的提高,如何有效利用地层水和压裂返排液配制压裂液成为英雄岭页岩油提质提效的迫切难题。因此,基于反向乳液聚合工艺,自主研发耐矿化度(15~20)×10⁴mg/L的抗盐型变黏滑溜水体系(QHYTYL-2)。该体系集“耐盐、降阻、防膨、破乳”等功能为一体,具有低成本、低伤害的特点;使用英雄岭干柴沟地区的地层水和压裂返排液复配该体系的低黏和高黏样品进行性能评价(表2、表3),各项指标均满足标准要求,具备现场应用条件。

表 2 抗盐型变黏滑溜水低黏体系性能指标测试结果表

Table 2 Test results of performance indicators of salt-resistant variable-viscosity slickwater low viscosity system

评价项目	行业指标	自主研发体系测试结果
稠化剂用量 /%	—	0.1
表观黏度 /(mPa·s)	≤ 5	1.9
减阻率 /%	≥ 75	75.2
破胶液黏度 /(mPa·s)	≤ 5.0	1.2
表面张力 /(mN·m ⁻¹)	≤ 28.0	27.89
界面张力 /(mN·m ⁻¹)	≤ 2.0	1.58
防膨率 /%	≥ 75	89.56
残渣含量 /(mg·L ⁻¹)	≤ 100	19

表 3 抗盐型变黏滑溜水高黏体系性能指标测试结果表

Table 3 Test results of performance indicators of salt-resistant variable-viscosity slickwater high viscosity system

评价项目	行业指标	自主研发体系测试结果
稠化剂用量 /%	—	1
破胶剂加量 /%	—	0.05~0.1
表观黏度 /(mPa·s)	≥ 50	90
耐温 /℃	—	90
耐温耐剪切能力 (170s ⁻¹ 、90min) /(mPa·s)	≥ 20	20
破胶液黏度 /(mPa·s)	≤ 5.0	4.6
表面张力 /(mN·m ⁻¹)	≤ 28.0	28.12
界面张力 /(mN·m ⁻¹)	≤ 2.0	1.61
防膨率 /%	≥ 75	90.54
残渣含量 /(mg·L ⁻¹)	≤ 100	65

在 YS1H6-3 井的第 15~24 段和 YS1H6-4 井的第 15~24 段施工中，现场试验压裂返排液混合清水配制低黏滑溜水体系，共使用 3300m³，现场减阻率达到 73.1%~74.6%、黏度为 20mPa·s，施工压力平稳（图 7），基本满足了体积压裂的施工需求。

3 矿场应用效果

直井实施 37 井次，获工业油流占比达 97.2%，落实了 14 个箱体的开发建产潜力，圈定核心区 80km²；水平井实施 6 井次，压后最高日产油 113.5m³，高产稳产最长达 260 天以上。同时，指导部署实施立体

开发试验平台一个，为后续大规模开发建产需要的降本增效做法、井网匹配优化、参数规模评价等工作作出探索；通过践行“直井扩面、落实目标，水平井提产、落实产能”工作思路，在英雄岭下干柴沟组上段落实页岩油地质储量 5×10⁸t，为柴达木盆地该类型页岩油资源的高效勘探开发提供了重要技术参考。

同时，在采用页岩油理念对柴达木盆地水平井体积压裂技术的升级优化过程中，深度剖析其提产、提效、降本的功能属性，优选、设计其“组合拳”工艺，针对性开展基础研究和地质工程一体化的方案优化与

实施,盆地水平井体积压裂各项关键参数指标均得到进一步的提升(图8);平均压裂段长缩短63%、簇间距减小58.6%、用液强度增加2.3倍、加砂强度

提升2.9倍;平均单井改造体积达到 $1744 \times 10^4 \text{m}^3$ 、单段压裂费用降低21.4%,具有柴达木特色的页岩油体积压裂技术体系初步形成。

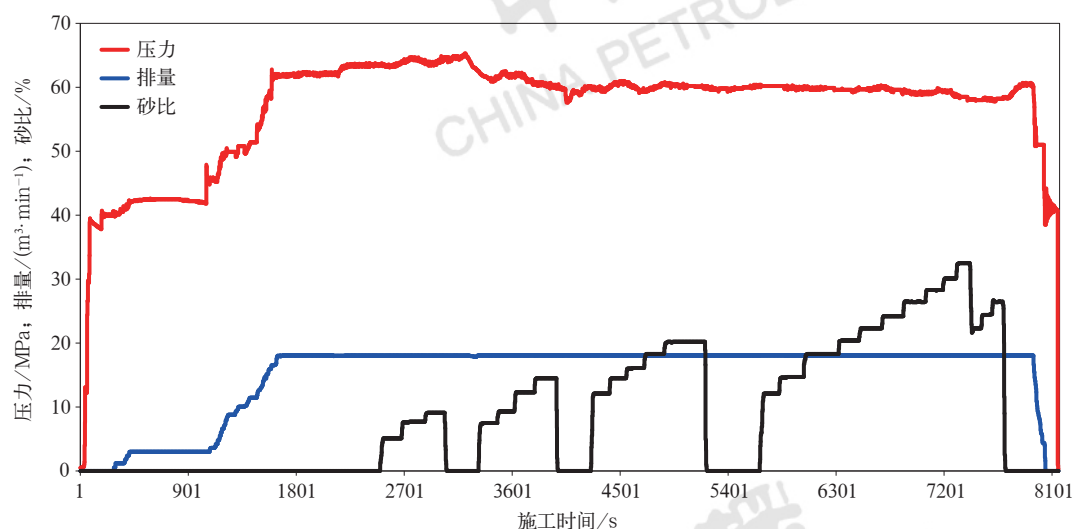


图7 YS1H6-3井第23段压裂施工曲线图

Fig.7 Fracturing construction curve of the 23rd stage in Well YS1H6-3

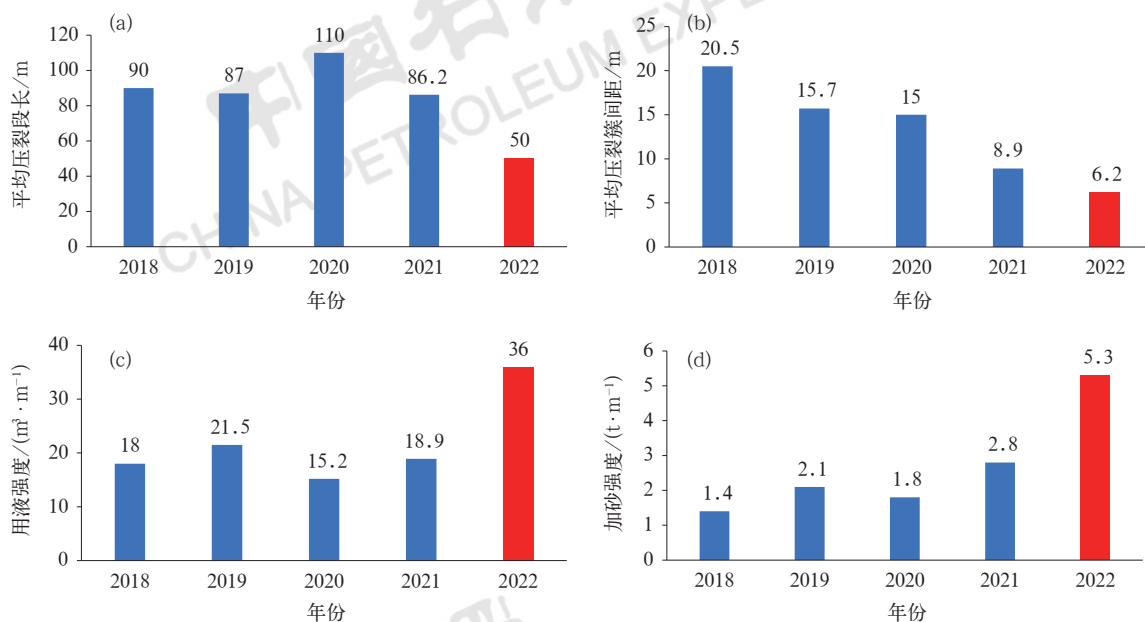


图8 柴达木盆地历年体积压裂关键参数对比图

Fig.8 Comparison of key parameters of volume fracturing in Qaidam Basin over the years

4 结论

(1) 英雄岭下干柴沟组上段页岩生烃潜量高、具有“两段式”生烃模式,纵向有效烃源岩厚度大且处于生油窗,生烃潜力巨大,页岩油资源勘探开发潜力巨大,但受沉积环境与强烈的地质构造运动影响,该

层系储层改造存在地应力高、水平应力差大、非均质性强、纵向层理发育等难点,常规致密储层压裂技术难以实现充分改造。

(2) 通过建立和实施英雄岭页岩地质力学实验评价方法,落实了纹层和层理对裂缝形态的控制作用显著、裂缝的纵向延伸难度较大的裂缝破裂特征,揭示

了灰云岩和纹层状岩相强度更低、更易形成复杂裂缝的延伸规律,并根据实验结果校正一维地质力学与可压裂性评价模型,最终结合三维地质模型,建立精细三维地质力学模型,为地质工程一体化压裂技术研究奠定平台基础。

(3) 基于英雄岭页岩层系地质特征和储层改造难点,明确英雄岭页岩储层在近井突破页岩层理、在裂缝远端制造复杂缝网的改造主体思路,采用模型—数据双驱动的方式实现页岩油直井缝网压裂技术的定型,并开展了“分层压裂、高效试油”的提效探索,取得直井改造后最高日产油 44.9m^3 、获工业油流占比达 97.2% 的成效,证实了英雄岭下干柴沟组上段页岩层系整体富油;同时,践行地质工程一体化的理念,建立多项工艺组合的柴达木特色页岩油体积压裂技术,以平台井立体动用的模式开展了提质增效先导性试验,践行“立体评价、整体动用”实施模式,压后最高日产油 113.5m^3 ,支撑英雄岭下干柴沟组上段落实页岩油地质储量 $5 \times 10^8\text{t}$ 。

(4) 针对英雄岭页岩油下一步扩大试验范围、在平面上挖掘外围潜力区、在纵向上落实不同甜点段的立体高效开发技术的研究需求,仍须在复合暂堵增加造缝强度、多尺度复杂缝网下优化立体支撑、压裂液与储层岩石相互作用机理等方面做细基础研究,在评价最优井网井距、立体布缝的科学性与改造经济性、神经网络学习模型持续迭代等方面做精方案优化,在优化措施液体系、提高滑溜水比例、地层水与压裂返排液配制滑溜水等方面做大降低成本的效果。

参考文献

- [1] 赵文智, 胡素云, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 1–10.
Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Hou Lianhua, *et al.* Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(1): 1–10.
- [2] 赵贤正, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 深盐湖相区页岩油富集理论、勘探技术及前景: 以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 143–162.
Zhao Xianzheng, Pu Xiugang, Zhou Lihong, *et al.* Enrichment theory, exploration technology and prospects of shale oil in lacustrine facies zones of deep basin: a case study of the Paleogene in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(2): 143–162.
- [3] 刘合, 孟思伟, 苏健, 等. 对中国页岩气压裂工程技术发展和工程管理的思考与建议[J]. 天然气工业, 2019, 39(4): 1–7.

- Liu He, Meng Siwei, Su Jian, *et al.* Reflections and suggestions on the development and engineering management of shale gas fracturing technology in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(4): 1–7.
- [4] 刘合, 黄有泉, 蔡萌, 等. 松辽盆地古龙页岩油储集层压裂改造工艺实践与发展建议[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 603–612.
Liu He, Huang Youquan, Cai Meng, *et al.* Practice and development suggestions of hydraulic fracturing technology in the Gulong shale oil reservoirs of Songliao Basin, NE China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(3): 603–612.
- [5] 颜泽, 龙国徽, 杨巍, 等. 柴达木盆地英雄岭地区古近系油气成藏过程及其演化特征[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(2): 94–102.
Wanyan Ze, Long Guohui, Yang Wei, *et al.* Hydrocarbon accumulation and evolution characteristics of Paleogene in Yingxiongling area, Qaidam Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(2): 94–102.
- [6] 李国欣, 伍坤宇, 朱如凯, 等. 巨厚高原山地式页岩油藏的富集模式与高效动用方式: 以柴达木盆地英雄岭页岩油藏为例[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 144–157.
Li Guoxin, Wu Kunyu, Zhu Rukai, *et al.* Enrichment model and high-efficiency production of thick plateau mountainous shale oil reservoir: a case study of the Yingxiongling shale oil reservoir in Qaidam Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 144–157.
- [7] 李国欣, 朱如凯, 张永庶, 等. 柴达木盆地英雄岭页岩油地质特征、评价标准及发现意义[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 18–31.
Li Guoxin, Zhu Rukai, Zhang Yongshu, *et al.* Geological characteristics, evaluation criteria and discovery significance of Paleogene Yingxiongling shale oil in Qaidam Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(1): 18–31.
- [8] 蔡萌, 唐鹏飞, 魏旭, 等. 松辽盆地古龙页岩油复合体积压裂技术优化[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(3): 156–164.
Cai Meng, Tang Pengfei, Wei Xu, *et al.* Optimization of composite volume fracturing technology for Gulong shale oil[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2022, 41(3): 156–164.
- [9] 朱颖. 页岩层理对其力学特性及裂缝起裂与扩展的影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
Zhu Ying. Study on the influence of oil shale bedding on its mechanical properties and fracture initiation and propagation[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [10] 武安安. 鄂尔多斯长7页岩油储层压裂裂缝扩展机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
Wu An'an. Research on fracture propagation mechanism of Chang 7 shale oil reservoir in Ordos[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.
- [11] 周彤, 王海波, 李凤霞, 等. 层理发育的页岩气储集层压裂裂缝扩展模拟[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 1039–1051.
Zhou Tong, Wang Haibo, Li Fengxia, *et al.* Numerical simulation of hydraulic fracture propagation in laminated

- shale reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020,47(5):1039–1051.
- [12] 李晓, 赫建明, 尹超, 等. 页岩结构面特征及其对水力压裂的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2019,40(3):653–660.
- Li Xiao, He Jianming, Yin Chao, *et al.* Characteristics of the shale bedding planes and their control on hydraulic fracturing[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019,40(3):653–660.
- [13] 许丹, 胡瑞林, 高玮, 等. 页岩纹层结构对水力裂缝扩展规律的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2015,42(4):523–528.
- Xu Dan, Hu Ruilin, Gao Wei, *et al.* Effects of laminated structure on hydraulic fracture propagation in shale[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015,42(4):523–528.
- [14] 张勇, 王志晟, 甘宇明, 等. 高应力差裂缝储层缝网压裂技术可行性研究及应用[J]. *钻采工艺*, 2019,42(4):50–53.
- Zhang Yong, Wang Zhisheng, Gan Yuming, *et al.* Feasibility study of network fracturing for high differential stress fractured reservoir and application[J]. *Drilling & Production Technology*, 2019,42(4):50–53.
- [15] 孙景行, 曾波, 刘俊辰, 等. 川南深层页岩水力压裂缝网扩展规律数值模拟研究[J]. *工程地质学报*, 2022,30(4):1193–1202.
- Sun Jingxing, Zeng Bo, Liu Junchen, *et al.* Modeling study on the hydraulic fracturing of deep shale reservoir in southern Sichuan[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022,30(4):1193–1202.
- [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] 翟文宝. 非均质页岩分段压裂裂缝扩展机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- Zhai Wenbao. Heterogeneity shale staged fracturing fracture mechanism research[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [18] 鲜成钢. 页岩气地质工程一体化建模及数值模拟: 现状、挑战和机遇[J]. *石油科技论坛*, 2018,37(5):24–34.
- Xian Chenggang. Shale gas geological engineering integrated modeling and numerical simulation: present conditions, challenges and opportunities[J]. *Oil Forum*, 2018,37(5):24–34.
- [19] 郑新权, 何春明, 杨能宇, 等. 非常规油气藏体积压裂2.0工艺及发展建议[J]. *石油科技论坛*, 2022,41(3):1–9.
- Zheng Xinquan, He Chunming, Yang Nengyu, *et al.* Volumetric fracturing 2.0 process for unconventional oil and gas reservoirs and R & D suggestions[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2022,41(3):1–9.
- [20] 胡文瑞. 地质工程一体化是实现复杂油气藏效益勘探开发的必由之路[J]. *中国石油勘探*, 2017,22(1):1–5.
- Hu Wenrui. Geology–engineering integration: a necessary way to realize profitable exploration and development of complex reservoirs[J]. *China Petroleum Exploration*, 2017,22(1):1–5.
- [21] 赵文智, 贾爱林, 位云生, 等. 中国页岩气勘探开发进展及发展展望[J]. *中国石油勘探*, 2020,25(1):31–44.
- Zhao Wenzhi, Jia Ailin, Wei Yunsheng, *et al.* Progress in shale gas exploration in China and prospects for future development[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020,25(1):31–44.
- [22] 吴奇, 梁兴, 鲜成钢, 等. 地质—工程一体化高效开发中国南方海相页岩气[J]. *中国石油勘探*, 2015,20(4):1–23.
- Wu Qi, Liang Xing, Xian Chenggang, *et al.* Geoscience—to–production integration ensures effective and efficient south China marine shale gas development[J]. *China Petroleum Exploration*, 2015,20(4):1–23.
- [23] 管保山, 刘玉婷, 梁利, 等. 页岩油储层改造和高效开发技术[J]. *石油钻采工艺*, 2019,41(2):212–223.
- Guan Baoshan, Liu Yuting, Liang Li, *et al.* Shale oil reservoir reconstruction and efficient development technology[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019,41(2):212–223.
- [24] 蒋廷学, 卞晓冰, 左罗, 等. 非常规油气藏体积压裂全生命周期地质工程一体化技术[J]. *油气藏评价与开发*, 2021,11(3):297–304, 339.
- Jiang Tingxue, Bian Xiaobing, Zuo Luo, *et al.* Whole lifecycle geology–engineering integration of volumetric fracturing technology in unconventional reservoir[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2021,11(3):297–304, 339.
- [25] 包汉勇, 梁榜, 郑爱维, 等. 地质工程一体化在涪陵页岩气示范区立体勘探开发中的应用[J]. *中国石油勘探*, 2022,27(1):88–98.
- Bao Hanyong, Liang Bang, Zheng Aiwei, *et al.* Application of geology and engineering integration in stereoscopic exploration and development of Fuling shale gas demonstration area[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022,27(1):88–98.