

引用格式: 邸士莹, 马收, 蔡履忠, 等. 苏北盆地陆相页岩油高强度压裂增产措施研究[J]. 油气藏评价与开发, 2026, 16(2): 434-442.

DI Shiyang, MA Shou, CAI Lyuzhong, et al. Research on high-intensity fracturing stimulation measures for continental shale oil in Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2026, 16(2): 434-442.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024587

苏北盆地陆相页岩油高强度压裂增产措施研究

邸士莹¹, 马收¹, 蔡履忠², 程时清³, 史文洋⁴

(1. 中石化华东石油工程有限公司华美孚泰油气增产技术服务有限责任公司, 北京 100101; 2. 中石化华东石油工程有限公司, 江苏 南京 210019; 3. 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室, 北京 102249; 4. 常州大学石油与天然气工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要:页岩油藏结构复杂, 储层普遍具有低渗、低孔特征, 基质向裂缝的供液能力较弱, 压裂增产措施是改善储层裂缝发育程度与流体流动能力的关键手段。传统压裂施工方案中, 针对储层结构特征对压裂强度影响的直接研究较少, 导致增产效果不佳。为优化压裂方案, 基于储层结构开展系统研究, 通过X射线衍射实验(XRD)明确岩石矿物成分及含量; 借助小直径真三轴实验获取岩石力学参数及应力-应变测试曲线; 结合电镜扫描资料与薄片观察确定储层微观结构; 利用渗吸实验及核磁共振实验(NMR), 基于 T_2 谱曲线分析储层岩石孔径分布特征。采用数值模拟方法, 对比常规强度压裂与高强度压裂后的裂缝扩展形态及产能差异。研究结果表明, 苏北页岩脆性矿物含量较高; 平行层理方向页岩破坏后裂缝主要沿层理发育, 垂直层理方向破裂形态多样, 岩心内部形成交叉复杂裂缝; 储层微观结构以粒间孔为主, 微裂缝以层理缝为主; 核磁共振 T_2 谱曲线显示储层岩心发育小孔隙、中孔隙及天然微裂缝。数值模拟结果显示, 该区块岩石特征适配高强度压裂方案(排量 $20\text{ m}^3/\text{min}$ 、单段液量 $4\ 000\text{ m}^3$ 、单段砂量 400 m^3)。实施该方案后, 水平井附近储层含油饱和度与压力场发生明显变化, 表明高强度压裂可形成更复杂的缝网系统, 提升储层流体流动性, 有效改善压裂增产效果。研究成果为页岩油藏压裂增产方案优化提供了参考依据。

关键词: 苏北盆地; 陆相页岩油; 矿物组分; 岩石力学参数; 微观结构; 孔径分布; 渗吸作用; 高强度压裂

中图分类号: TE348

文献标识码: A

Research on high-intensity fracturing stimulation measures for continental shale oil in Subei Basin

DI Shiyang¹, MA Shou¹, CAI Lyuzhong², CHENG Shiqing³, SHI Wenyang⁴

(1. SinoFTS Petroleum Services Ltd., Beijing 100101, China; 2. Sinopec East China Petroleum Engineering Company, Nanjing, Jiangsu 210019, China; 3. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164, China)

Abstract: Shale oil reservoirs are characterized by complex structures, low permeability, and low porosity. The fluid supply capacity from the matrix to the fractures is weak. Fracturing stimulation measures are key methods for improving the degree of fracture development and fluid flow capacity in the reservoirs. In traditional fracturing construction plans, there are limited direct studies on the influence of reservoir structural characteristics on fracturing intensity, which leads to poor production enhancement results. To optimize the fracturing design, systematic research was conducted based on the reservoir structure, and X-ray diffraction (XRD) experiments were used to clarify the mineral composition and content of the rocks. Small-diameter true triaxial experiments were performed to obtain rock mechanics parameters and stress-strain test curves. Scanning electron microscope data and thin section observations were combined to determine the microstructure of the reservoir. Imbibition experiments and nuclear magnetic resonance (NMR) experiments were conducted, and the pore size distribution characteristics of the reservoir rocks were analyzed based on the T_2 spectrum curves. Numerical simulation method was used to compare the fracture propagation patterns and production capacity differences between conventional intensity fracturing and high-intensity fracturing. The results showed that the shale from Subei Basin had a high content of brittle minerals. After failure in the direction

收稿日期: 2025-03-31。

第一作者简介: 邸士莹(1982—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事页岩油气渗吸机理、油气藏增产技术研究, 地质工程一体化研究。地址: 北京市朝阳区北辰世纪中心A座938室, 邮政编码: 100101。E-mail: dishiyang_320@163.com

通信作者简介: 马收(1973—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事非常规油气藏增产措施、致密油藏渗流规律、动态监测一体化研究。地址: 北京市朝阳区北辰世纪中心A座938室, 邮政编码: 100101。E-mail: shou.ma@sinofts.com

基金项目: 国家自然科学基金项目“致密油藏注水诱发微裂缝机理反演化方法”(11872073); 2022年教育部“春晖计划”合作科研项目“断溶体油藏多分支储层产液规律研究”(HZKY20220144); 中石化华东石油工程有限公司项目“页岩水力压裂天然裂缝扩展研究”(ECPE20230315)。

parallel to bedding, fractures mainly developed along the bedding, while in the direction vertical to bedding, the fracture patterns were diverse, and complex intersecting fractures were formed inside the core. The microstructure of the reservoir was mainly composed of intergranular pores, and the micro-fractures were mainly layer-bedding fractures. The NMR T_2 spectrum curves showed that the reservoir core developed small pores, medium pores, and natural micro-fractures. The numerical simulation results indicated that the rock characteristics of this block were suitable for implementing the high-intensity fracturing plan (displacement rate of 20 m³/min, single-stage fluid volume of 4 000 m³, and single-stage sand volume of 400 m³). After the implementation of this plan, significant variations were observed in the oil saturation field and pressure field of the reservoir near the horizontal well, indicating that high-intensity fracturing could form a more complex fracture network system, enhance the fluid mobility of the reservoir, and effectively improve the fracturing stimulation effectiveness. The research findings provide a reference for the optimization of fracturing stimulation plans in shale oil reservoirs.

Keywords: Subei Basin; continental shale oil; mineral components; rock mechanics parameters; microstructure; pore size distribution; imbibition effect; high-intensity fracturing

中国陆相页岩油资源量近 $346 \times 10^8 \text{ t}^{[1-2]}$,页岩油资源丰富,勘探潜力巨大,已成为中国石油增储上产的重要战略性接替资源^[3-5]。然而,页岩储层普遍具有低孔、特低渗特征,给页岩油勘探开发带来严峻挑战,需通过大规模压裂改造才能获得工业产能^[6-8]。页岩油藏成藏机理复杂、储层连通性差,基质向裂缝的供液能力较弱^[9],常规油藏压裂技术已难以适配其开发需求^[10-12]。针对这一问题,科研人员开展了大量针对性研究工作,其中水平井分段多簇压裂技术已在页岩油开发中得到广泛应用^[13-14]。在压裂施工中,通过提高注入量以增强携砂能力,是实现裂缝有效支撑与复杂缝网形成的常用技术路径。高强度压裂作为一种高效增产措施,以大规模压裂为基础,通过提高压裂液排量、增加单段加砂量及单段液量,借助高压注入大量压裂液,可有效扩大压裂液与储层的接触面积和波及体积^[15-16]。

大量压裂液进入裂缝与孔隙后,形成压力差驱动裂缝持续扩展,压裂液与储层的接触范围随之扩大;因储层普遍孔渗很低,大部分压裂液滞留于储层内,导致压裂液注入量与返排量差异显著^[17-19]。储层孔隙及天然微裂缝的发育,不仅增加了页岩油储集空间^[20],决定储层流体可动性,还是页岩油运移和渗流的优势通道。因此,储层微观结构是控制页岩油能否实现高产稳产的关键因素^[21-24]。明确储层孔隙与天然微裂缝的分布特征,有助于优化压裂方案、降低压裂难度,并促进压裂裂缝的生成与延展。分析储层岩石组分可提升储层可压性评价精度,这对储层工程甜点评价具有重要意义^[25-28]。页岩孔径多为纳米级小孔,压裂液进入储层后易发生大规模渗吸作用^[29]。

常规页岩储层致密,结构相对均一,天然裂缝发育少且抗压强度较高;层理页岩则各向异性显著,具有明显层状结构,在矿物成分、颜色等方面呈现差异化特征^[30-31]。上述研究方法在层理页岩中应用较少,由于层理页岩与常规页岩在渗流特征、微观结构上存在显著差异,常规研究成果无法直接应用于层理页岩储层。苏北页岩作为陆相页岩,纹层与层理缝发育是其特有的地质特征^[32-34],这

种微观储层结构一方面可改善储层流动空间,增强连通性;另一方面,层理缝与纹层的发育有助于压裂过程中形成复杂缝网,进而提升压裂增产效果^[35]。本文重点针对层理对裂缝扩展的影响开展研究,暂未涉及纹层相关内容。

本文充分利用页岩油藏孔隙与天然微裂缝发育的特性,采用高强度压裂工艺,以进一步增强裂缝复杂性,扩大泄油面积,更大范围地沟通并开启孔隙与天然微裂缝,最终形成有效缝网系统,实现单井产量提升。研究成果可为压裂方案优化提供理论支撑,对于提升层状页岩油藏压裂改造效果具有重要实践意义。

1 矿物组分及岩石力学特征

苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段埋深介于 3 556~4 002 m,厚度介于 150~400 m,有效孔隙度为 5%,水平渗透率最大为 $0.106 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,压力系数介于 1.3~1.5。矿场实践与室内实验表明,该区块页岩储层内发育天然裂缝、层理等软弱结构面^[36]。

测试储层岩石的矿物成分、含量及力学参数,并基于此开展储层可压性评价,可为分析储层压裂难易程度及压裂后裂缝形态特征提供依据,这是压裂改造优化设计的重点工作之一。

1.1 矿物组分及物性特征

研究表明,苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段页岩脆性矿物由石英、长石、方解石及白云石组成,脆性矿物含量变化范围大,介于 10.0%~76.6%,平均为 43.69%;黏土矿物以伊蒙混层与伊利石为主,含量介于 28.25%~56.80%,其次为绿泥石,含量介于 0.78%~4.36%。实验结果显示,该区块岩心脆性矿物含量较高,采用高强度压裂措施更易形成裂缝。

1.2 岩石力学特征

岩石力学参数包括杨氏模量、泊松比等,这些参数决定了压裂过程中是否易形成裂缝,以及裂缝的形态及尺寸^[37-38]。

钻取4块大小为5.0 cm×2.5 cm的圆柱体岩心试样,标号分别为 R_{h1} 、 R_{h2} 、 R_{v1} 、 R_{v2} ,用于渗透率测试及岩石力学实验。其中, R_{h1} 、 R_{h2} 沿平行储层层理方向钻取, R_{v1} 、 R_{v2} 则沿垂直储层层理方向钻取。选取 R_{h1} 、 R_{v2} 2块岩心开展渗透率测试(表1)。由表1可见, R_{h1} 的渗透率明显高于 R_{v2} ,即平行层理方向岩心渗透率明显高于垂直层理方向岩心。这表明该储层压裂后,压裂液在平行层理方

向具有优先液优势,可促进天然裂缝扩展,故平行层理方向储层压裂效果明显优于垂直层理方向^[39-40]。垂直层理方向的起裂压力高于平行层理方向,因此,需通过高强度压裂措施才能促使垂直层理方向产生裂缝。

实验所用压裂液采用“高黏、低排量、中等应力差”体系,黏度为20 mPa·s,排量为10 mL/min,其主要成分为清水、胍胶粉及降阻剂。

表1 岩心基本信息

Table 1 Basic information of core samples

岩心编号	直径/cm	长度/cm	测试压力/kPa	孔隙体积/(m ³ /m ³)	孔隙度/%	渗透率/10 ⁻³ μm ²
R_{h1}	2.504	4.970	168.2	1.776 341	7.257 9	0.001 879 400
R_{v2}	2.508	4.996	166.2	2.236 766	9.182 1	0.000 890 329

岩心试样在外力作用下会产生纵向与横向位移,通过测量其在轴向与横向压力作用下的纵向、横向变形量,可计算得到弹性模量与泊松比。对 R_{h2} 、 R_{v2} 岩心试样开展小尺寸真三轴压缩条件下的岩石力学参数测试,测试结果见表2。需说明的是,表2中“差应力”指轴向应力与围压的差值。

表2 岩石力学参数测试数据

Table 2 Test data of rock mechanics parameters

参数	R_{h2}	R_{v2}
围压/MPa	22	22
长度/mm	49.39	49.96
直径/mm	24.91	25.10
荷载/N	127 210	83 052
差应力/MPa	261.0	167.8
弹性模量/GPa	31.28	18.85
泊松比	0.20	0.13

大量研究证实,当页岩弹性模量大于24 GPa、泊松比小于0.25时,有利于压裂后复杂缝网的形成^[41-43]。由表2可见,垂直层理方向岩心的弹性模量为18.85 GPa,未达到24 GPa;平行与垂直层理方向的泊松比分别为0.20、0.13,均小于0.25。这表明该区块页岩仅依靠常规压裂难以形成网状裂缝,提高压裂强度可促进垂直层理方向岩心形成裂缝,进而促成复杂裂缝网络的形成。

图1为岩心应力加载后的裂缝破裂形态,由图1a可见,平行层理岩心经小尺寸真三轴测试后,页岩破坏形态单一;垂直层理岩心经相同测试后,破裂形态多样,裂缝以Y型为主,且多呈相互贯通特征(图1b)。

应力-应变曲线可反映页岩的力学性能及破裂特征,图2为典型页岩心试样的应力-应变曲线。平行层理方向上,径向应变与轴向应变曲线达到峰值后,先呈长时间垂直下降趋势,随后短暂回升,之后继续垂直下降(图2a)。垂直层理方向上,径向应变与轴向应变曲线在峰值

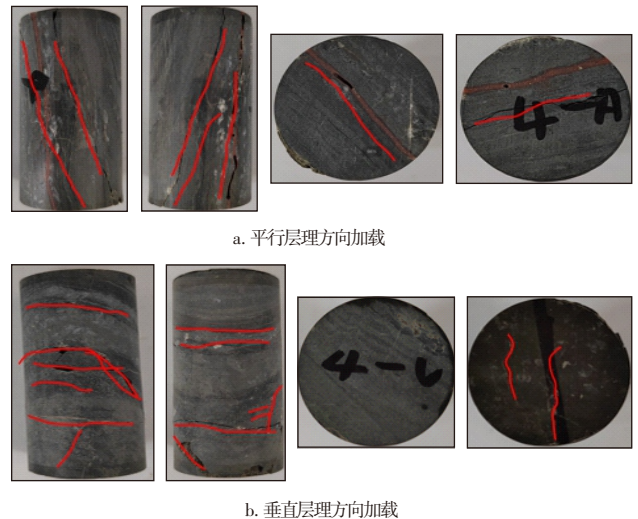


图1 岩心应力加载后的裂缝破裂形态

Fig. 1 Fracture morphology of core samples after stress loading

点发生破坏后,呈“垂直下降—大幅回升并超过峰值—再次垂直下降”的特征(图2b)。

上述研究表明,在22 MPa围压条件下,平行层理方向页岩破坏形态单一,其核心原因在于,该方向岩心为天然裂缝不发育的填充物型,裂缝主要沿层理方向扩展。垂直层理方向页岩破裂形态多样,既发育平行于层理方向的裂缝,又会产生垂直于层理方向的裂缝,最终使岩心内部形成交叉连通的复杂裂缝网络。

2 页岩储层结构

2.1 微观结构

图3为苏北盆地典型页岩水平井岩心的扫描电镜照片,由图可见,该区块储层微观孔隙以粒间孔为主,其次为黏土矿物晶间孔等。图4为典型井岩心的薄片显微照片,由图可见,该区块储层发育大量天然微裂缝,主要为层理缝、构造缝。

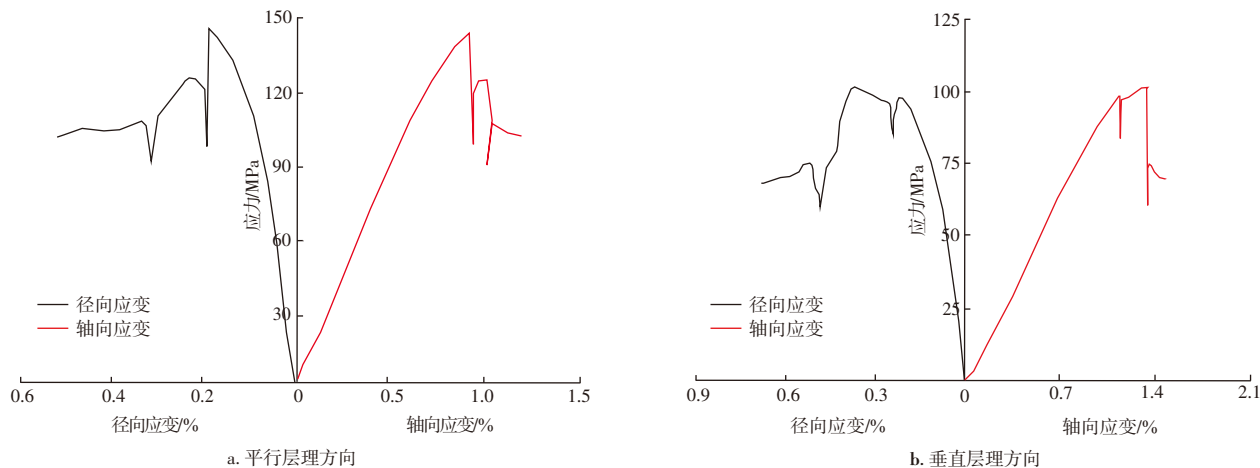


图2 岩心应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of core samples

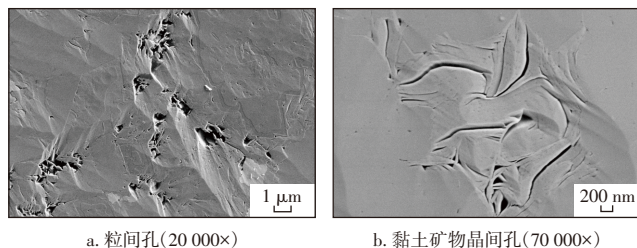


图3 苏北盆地典型页岩水平井岩心扫描电镜照片

Fig. 3 Scanning electron microscope images of typical shale core samples from horizontal well in Subei Basin

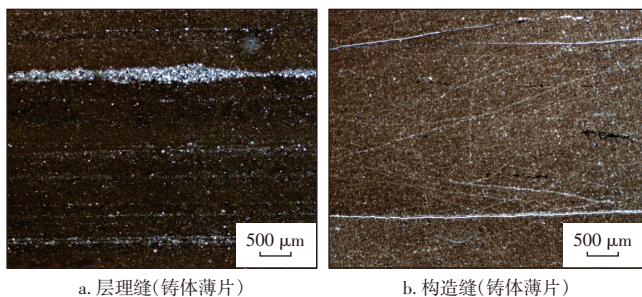


图4 苏北盆地典型页岩水平井岩心铸体薄片显微照片

Fig. 4 Microphotographs of cast thin sections of typical shale core samples from horizontal well in Subei Basin

2.2 孔径分布

明确储层微观结构后,需进一步了解孔径分布特征,为储层可压裂性评估提供依据。通过渗吸实验与核磁共振(NMR)实验,分析储层孔径分布规律。将渗吸72 h后的岩心进行核磁共振测试,得到核磁共振 T_2 谱曲线。 T_2 谱曲线可表征储层岩石的孔隙结构特征,反映不同尺寸孔隙的分布情况。 T_2 值较短时,对应小孔隙及束缚水; T_2 值较长时,则对应大孔隙及游离水。岩心的核磁共振 T_2 谱曲线可为压裂方案设计提供关键储层物性参数,可以帮助优化压裂工艺,提高油气产量。

大量研究表明,根据 T_2 谱峰个数可将页岩划分为单峰型、双峰型和多峰型3类。单峰型页岩孔隙分布比较集中,储层非均质性较弱;双峰型页岩又分为左高型与右高型,其中左高型页岩以小孔隙为主,右高型页岩则以大孔隙为主;多峰型页岩可分为基质型与裂缝型,其中裂缝型页岩经压裂改造后增产效果明显。

渗吸实验与核磁共振测试均在特定条件下开展:温度25℃、压力1.01 MPa,地层水环境参数为CaCl₂型、pH值6.2、总矿化度49 779 mg/L。实验中将饱和油岩心置于渗吸装置内,动态监测并记录渗吸过程;渗吸72 h后,将岩心严密包裹,进行核磁共振测试。

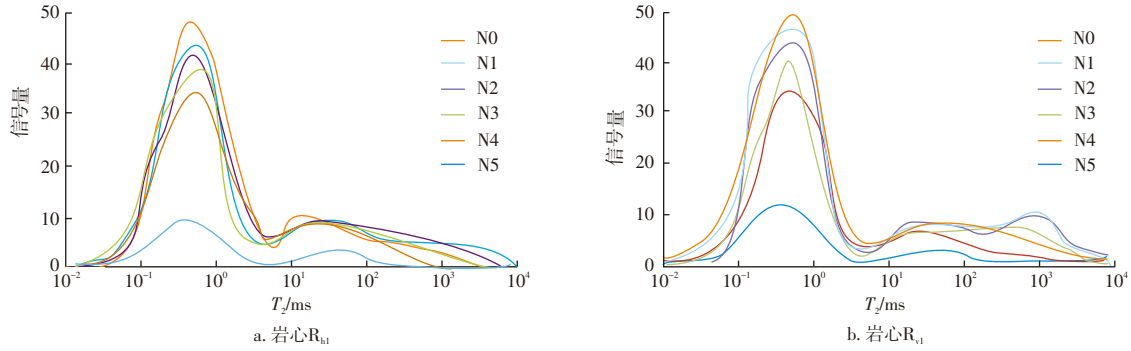
2类岩心的核磁共振实验结果显示, R_{h1} 、 R_{v1} 的 T_2 谱曲线均呈多峰特征(图5)。由图5可见,2类岩心孔隙均包含小孔隙、中孔隙及天然微裂缝,且流体赋存空间以小孔隙为主,其次为中孔,该类孔隙特征更利于渗吸置换作用的发生。

通过薄片观察、扫描电镜分析及岩心描述、电阻率成像测井仪(FMI)测井资料,明确该区块页岩储集空间为立体复杂的孔缝系统,主要为层理缝、微裂缝,其次为基质孔隙。

3 页岩高强度压裂设计

3.1 原理分析

前文研究表明,该区块岩石脆性矿物含量较高,平行层理方向岩心的杨氏模量、泊松比均大于垂直层理方向的岩心,结合应力-应变曲线中径向与轴向应变在峰值后先垂直下降、再持续下降的特征,进一步说明页岩脆性程度较高,压裂后易形成裂缝。扫描电镜与薄片观察结果显示,储层微观结构以粒间孔与层理缝为主;渗吸及核磁共振实验表明,压裂液优先进入小孔隙,再依次充注中

图5 岩心渗吸实验后 T_2 谱曲线Fig. 5 T_2 spectrum curves after core imbibition experiment

孔隙与微裂缝,说明储层内小孔隙发育。

苏北盆地页岩压裂的难点是如何有效连通储层孔隙与微裂缝,形成页岩油高效开采通道。而高强度压裂可通过在储层内形成压力差,促使压裂裂缝形成并沟通微裂缝、中孔隙及小孔隙,最终形成大规模裂缝网络,实现页岩油的高效释放。

高强度压裂作为一种复杂工艺技术,可形成更长、更宽的压裂裂缝,增加有效渗透通道,大幅提升页岩油流动速率。假设天然微裂缝发生扩展,油水两相等温流动,考虑地层岩石与流体的可压缩性,建立压裂后油水两相连续性方程^[44]。在压裂过程的油水两相渗流中,压裂液注入与原油产出导致储层含油、含水饱和度动态变化,相应的油相及水相连续性方程如下:

$$\frac{\partial[\varphi(p_o)\rho_o(p_o)S_o]}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho_o(p_o) \left(-\frac{k_{ro}(S_o)}{\mu_o} \nabla p_o \right) \right] = q_o \quad (1)$$

$$\frac{\partial[\varphi(p_w)\rho_w(p_w)S_w]}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho_w(p_w) \left(-\frac{k_{rw}(S_w)}{\mu_w} \nabla p_w \right) \right] = q_w \quad (2)$$

$$S_o + S_w = 1 \quad (3)$$

式中: p_o 为油相压力,单位MPa; p_w 为水相压力,单位MPa; ρ_o 为油层条件下的原油密度,单位 10^3 kg/m^3 ; ρ_w 为油层条件下地层水密度,单位 10^3 kg/m^3 ; k_{ro} 为油相对渗透率; k_{rw} 为水相对渗透率; μ_o 为原油黏度,单位 $\text{mPa}\cdot\text{s}$; μ_w 为地层水的黏度,单位 $\text{mPa}\cdot\text{s}$; q_o 为产液量,单位 m^3 ; q_w 为注入量,单位 m^3 ; S_o 为含油饱和度,%; S_w 为含水饱和度,%; φ 为油层条件下孔隙度,%; t 为时间,单位s。

$$\rho_o = \rho_{o,0} \exp[-c_o(p_o - p_{o,0})] \quad (4)$$

$$\rho_w = \rho_{w,0} \exp[-c_w(p_w - p_{w,0})] \quad (5)$$

$$\varphi = \varphi_0 \exp[-c_r(p - p_0)] \quad (6)$$

式中: $p_{o,0}$ 为油相初始压力,单位MPa; $p_{w,0}$ 为水相初始压力,单位MPa; ρ_o 为油层条件下原油密度,单位 10^3 kg/m^3 ; $\rho_{o,0}$ 为油层条件下原油初始密度,单位 10^3 kg/m^3 ; ρ_w 为油

层条件下地层水初始密度,单位 10^3 kg/m^3 ; φ_0 为地层条件下孔隙度,%; c_o 为原油压缩系数,单位 MPa^{-1} ; c_r 为岩石压缩系数,单位 MPa^{-1} ; c_w 为地层水压缩系数,单位 MPa^{-1} ; p_0 为原始地层压力,单位MPa; p 为地层压力,单位MPa。

本次数值模拟基于商业软件平台开展,计算过程中考虑裂缝导流能力变化。该平台无需对网格进行加密处理,且可构建三维倾斜嵌入式裂缝,在大规模复杂缝网模拟方面具有显著优势。

3.2 压裂模拟分析

为探讨高强度压裂在研究区的应用可行性^[45-49],基于前文储层特征研究成果,结合苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段的物性参数、监测数据及地质条件,优选各项参数(表3),确定压裂施工参数如下:布缝方式采用拉链式,水平井部署10段主裂缝,每段设置6簇射孔。模拟流程以Petrel软件构建的精细地质模型为基础,通过Knetix压裂模拟软件开展压裂过程模拟,在地质模型上生成非结构网格后,利用Petrel RE模块建立目标区域的数值模拟模型。

3.2.1 高强度页岩压裂裂缝形态表征

压裂后在井筒附近优先形成垂直主裂缝,主裂缝起裂后可促使井筒附近含充填物的层理裂缝开启。这些开启的裂缝会进一步沟通水平井附近的其他天然裂缝,使近井筒区域形成更复杂的裂缝网络。压裂液从垂直主裂缝进入周围开启的天然层理裂缝后,储层吸液能力增加。

为构建有效缝网并扩大储层沟通范围,需对压裂液排量等关键施工参数进行优化。本次模拟设置2种压裂制度:常规强度压裂,排量 $15 \text{ m}^3/\text{min}$ 、单段液量 2000 m^3 、单段砂量 200 m^3 ;高强度压裂,排量 $20 \text{ m}^3/\text{min}$ 、单段液量 4000 m^3 、单段砂量 400 m^3 。在不限制裂缝延伸长度的条件下,分别对2种压裂制度开展模拟计算,重点分析高强度压裂后的缝网形态特征,模拟结果见图6。

表3 数值模拟参数
Table 3 Parameters for numerical simulation

参数		取值
模型尺寸	模型尺寸/m	1 000×800
	网格尺寸/m	50×50×3
储层参数	油层中部深度/m	3 800
	油层厚度/m	150~200
	基质渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	0.28
	地层最小水平应力/MPa	67.1
	压力梯度/(MPa/hm)	1.2
	岩石压缩系数/ MPa^{-1}	$1.425 4 \times 10^{-3}$
流体参数	综合压缩系数/ MPa^{-1}	0.4×10^{-3}
	黏度/($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	5.15~16.50
	密度/(g/cm^3)	0.789 5
井参数	含油饱和度/%	19.9%~53.3%
	水平井长度/m	1 210
	裂缝宽度/m	0.003
	裂缝条数/条	60
	裂缝长度/m	100~200

由图6可见,常规强度压裂时,裂缝起裂后优先开启近井筒区域的少量天然层理裂缝;而高强度压裂可在近井地带及裂缝延伸路径上形成高压环境,促使近井区域裂缝密集起裂并引起更大范围储层破裂。这种高压环境可驱动压裂主裂缝沟通远井筒区域的弱层理及闭合天然

微裂缝,最终形成含多分支的复杂缝网。高强度压裂后,井筒附近缝网更加复杂,井底区域流体渗流能力增强,支撑剂运移顺畅且能够抵达裂缝尖端。

3.2.2 高强度页岩压裂产能评价

通过分析储层含油饱和度场与压力场的动态变化,可精准评价压裂改造效果及储层生产潜力。本次模拟对比分析常规强度与高强度压裂下储层含油饱和度场的变化特征(图7)。由图7b可见,高强度压裂后水平井附近储层含油饱和度场发生明显变化。这表明采用高强度压裂措施后,储层形成复杂裂缝网络,进而提升储层渗透率,增强流体渗流能力,扩大压裂液波及范围。储层渗吸置换作用因此被强化,更多孔隙内的原油参与渗吸交换,地层原油得以持续产出,最终导致储层含油饱和度场发生变化。

针对常规强度与高强度压裂制度,本次模拟同步分析了储层压力场的变化(图8)。由图8可见,高强度压裂后水平井附近储层压力场发生变化。这表明高强度压裂通过提升井筒附近缝网复杂度,构建的有效缝网不仅为页岩油储集空间提供了优势通道,更在压裂液返排后推动原油高效产出,直接导致地层压力大幅降低(图8b)。值得注意的是,地层压力虽显著下降但仍维持在较高水平,这一特征表明该井地层能量充足,仍可保持一段时间的稳产^[50]。

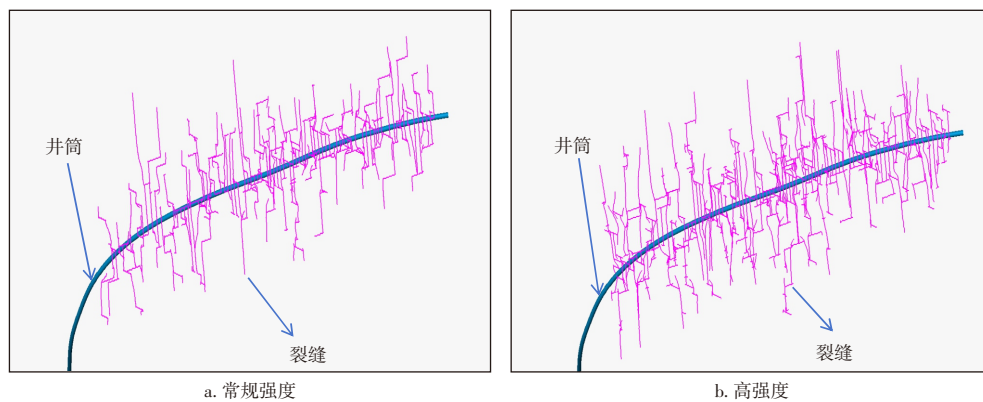


图6 考虑不同强度下压裂裂缝扩展形态
Fig. 6 Fracture propagation morphology under different fracturing intensities

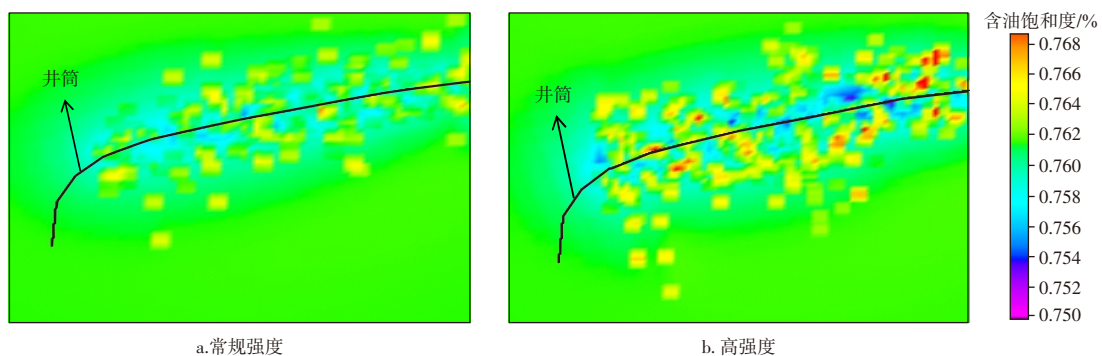


图7 不同强度压裂措施储层含油饱和度场变化
Fig. 7 Variations in oil saturation field of reservoirs under different fracturing intensities

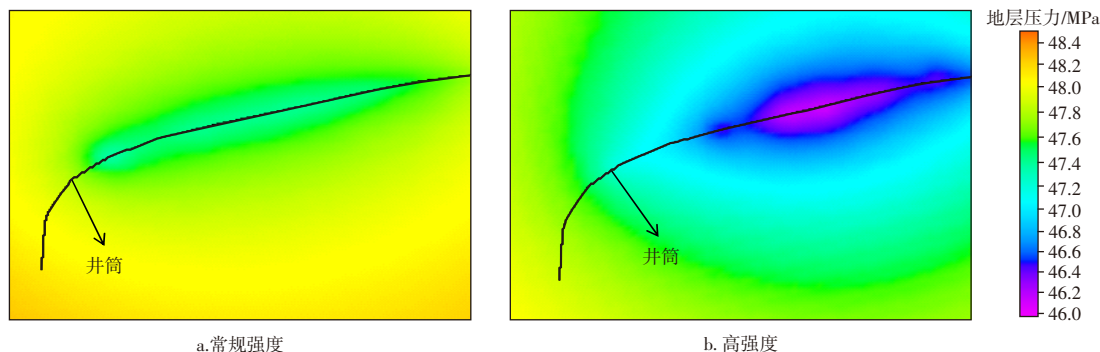


图8 不同强度压裂措施储层压力场变化

Fig. 8 Variations in pressure field of reservoirs under different fracturing intensities

4 结论

1) 苏北页岩脆性矿物主要为石英、长石、方解石等,脆性矿物含量高且变化范围大,且自上而下逐渐增加;黏土矿物以伊蒙混层、伊利石为主,其次为绿泥石。岩石力学实验表明,当围压为22 MPa时,平行层理方向岩心脆性特征明显;垂直层理方向岩心加载后多为Y型裂缝,岩心内部形成复杂缝网。

2) 苏北页岩储层微观结构主要包含孔隙与微裂缝,孔隙以粒间孔为主,微裂缝则以层理缝为主。岩心核磁共振 T_2 谱曲线显示,储层孔隙结构涵盖小孔隙、中-大孔隙及天然微裂缝;流体赋存空间以小孔隙为主,其次为中-大孔隙,该类孔隙组合特征更有利于发生渗吸置换作用。

3) 高强度压裂数值模拟结果表明,压裂主裂缝可有效沟通远井筒区域的弱层理及闭合天然微裂缝,形成复杂裂缝网络。水平井附近储层的含油饱和度场与压力场呈现明显变化,这说明高强度压裂通过提升井筒附近裂缝的复杂度,压裂后形成复杂的缝网,构建的有效缝网为页岩油渗流提供了优势通道,压裂液返排后可推动地层原油持续高效产出。

参考文献

- [1] 孙龙德,刘合,朱如凯,等.中国页岩油革命值得关注的十个问题[J].石油学报,2023,44(12):2007-2019.
SUN Longde, LIU He, ZHU Rukai, et al. Ten noteworthy issues on shale oil revolution in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2007-2019.
- [2] 邹才能,朱如凯,董大忠,等.页岩油气科技进步、发展战略及政策建议[J].石油学报,2022,43(12):1675-1686.
ZOU Caineng, ZHU Rukai, DONG Dazhong, et al. Scientific and technological progress, development strategy and policy suggestion regarding shale oil and gas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1675-1686.
- [3] 孙焕泉,王海涛,杨勇,等.陆相断陷湖盆页岩油开发技术迭代与发展方向[J].石油勘探与开发,2024,51(4):865-877.
SUN Huanquan, WANG Haitao, YANG Yong, et al. Iteration and evaluation of shale oil development technology for continental rift lake basins[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 865-877.
- [4] 金之钧,朱如凯,梁新平,等.当前陆相页岩油勘探开发值得关注的几个问题[J].石油勘探与开发,2021,48(6):1276-1287.
JIN Zhijun, ZHU Rukai, LIANG Xinping, et al. Several issues worthy of attention in current lacustrine shale oil exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1276-1287.
- [5] 郭旭升,申宝剑,李志明,等.论我国页岩油气的统一性[J].石油实验地质,2024,46(5):889-905.
GUO Xusheng, SHEN Baojian, LI Zhiming, et al. Discussion on the uniformity of shale oil and gas in China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(5): 889-905.
- [6] 高玉巧,花彩霞,蔡潇,等.苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段页岩油储层裂缝形成机制及对烃类赋存的影响[J].地学前缘,2024,31(5):35-45.
GAO Yuqiao, HUA Caixia, CAI Xiao, et al. Fracture formation mechanism in shale oil reservoirs, Qintong Depression, North Jiangsu Basin and its influence on hydrocarbon occurrence[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(5): 35-45.
- [7] 魏登峰.新疆地区页岩油气资源潜力及勘探方向[J].石油物探,2024,63(6):1087-1099.
WEI Dengfeng. Potential resources and exploration direction of shale oil and gas in Xinjiang[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2024, 63(6): 1087-1099.
- [8] 熊亮,董晓霞,王同,等.川北地区下侏罗统大安寨段陆相页岩油勘探方向再认识[J].石油实验地质,2024,46(5):989-1001.
XIONG Liang, DONG Xiaoxia, WANG Tong, et al. Reassessment of exploration directions of continental shale oil in Lower Jurassic Da'anzhai Member in northern Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(5): 989-1001.
- [9] 袁丽娜,王广涛,王成旺,等.层理对侏罗系油藏水力裂缝扩展形态影响研究[J].油气藏评价与开发,2024,14(6):908-917.
YUAN Lina, WANG Guangtao, WANG Chengwang, et al. Study on influence of bedding on hydraulic fracture propagation morphologies in Jurassic reservoirs[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(6): 908-917.
- [10] 郭彤楼,熊亮,雷炜,等.四川盆地南部威荣、永川地区深层页岩气勘探开发进展、挑战与思考[J].天然气工业,2022,42(8):45-59.
GUO Tonglou, XIONG Liang, LEI Wei, et al. Deep shale gas exploration and development in the Weirong and Yongchuan areas, South Sichuan Basin: Progress, challenges and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(8): 45-59.

- [11] 胡东风,魏志红,李宇平,等.四川盆地东南部地区复杂构造带深层页岩气勘探进展与突破[J].天然气工业,2022,42(8):35-44.
HU Dongfeng, WEI Zhihong, LI Yuping, et al. Deep shale gas exploration in complex structure belt of the southeastern Sichuan Basin: Progress and breakthrough[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(8): 35-44.
- [12] 何希鹏,王凯,何贵松,等.复杂构造带常压页岩气开发刻度区建立及其意义[J].天然气工业,2025,45(3):16-35.
HE Xipeng, WANG Kai, HE Guisong, et al. Establishment of calibrated area of normal pressure shale gas development in complex structure belts and its significance[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(3): 16-35.
- [13] 侯雅儒.水平井段内多簇压裂裂缝起裂与扩展规律研究[D].北京:中国石油大学(北京),2017.
HOU Yaru. Research on fracture initiation and propagation among multi-cluster fracturing in horizontal well[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [14] 刘巍,曹小朋,胡慧芳,等.页岩油水平井产量影响因素分析及压裂参数优化决策[J].油气藏评价与开发,2024,14(5):764-770.
LIU Wei, CAO Xiaopeng, HU Huifang, et al. Production influencing factors analysis and fracturing parameters optimization of shale oil horizontal wells[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(5): 764-770.
- [15] 李平,樊平天,郝世彦,等.大液量大排量低砂比滑溜水分段压裂工艺应用实践[J].石油钻采工艺,2019,41(4):534-540.
LI Ping, FAN Pingtian, HAO Shiyuan, et al. Application practice of the slick-water staged fracturing of massive fluid, high displacement and low sand concentration[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(4): 534-540.
- [16] 郑有成,范宇,雍锐,等.页岩气密切割分段+高强度加砂压裂新工艺[J].天然气工业,2019,39(10):76-81.
ZHENG Youcheng, FAN Yu, YONG Rui, et al. A new fracturing technology of intensive stage + high-intensity proppant injection for shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(10): 76-81.
- [17] 张路锋,周福建,张士诚,等.基于压力脉冲法的储层基质压裂液伤害评价[J].油气地质与采收率,2018,25(3):89-94.
ZHANG Lufeng, ZHOU Fujian, ZHANG Shicheng, et al. Experimental study on reservoir matrix damage caused by fracturing fluids based on transient pressure pulse method[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(3): 89-94.
- [18] 李春颖,张志全,林飞,等.压裂液在页岩储层中的滞留与吸收初步探索[J].科技通报,2016,32(8):31-35.
LI Chunying, ZHANG Zhiquan, LIN Fei, et al. Initial exploration of fracturing fluid retention in shale reservoirs[J]. Bulletin of Science and Technology, 2016, 32(8): 31-35.
- [19] 宿航,李瑞雪,邓虎成,等.致密砂岩储层压裂效果地质-工程影响因素评价[J].石油实验地质,2024,46(6):1349-1361.
SU Hang, LI Ruixue, DENG Hucheng, et al. Comprehensive evaluation of geological and engineering factors affecting fracturing effectiveness in tight sandstone reservoirs[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(6): 1349-1361.
- [20] 蒋代琴,李平平,邹华耀.川东北元坝地区侏罗系陆相页岩天然裂缝发育特征及其对页岩油气富集和保存的影响[J].现代地质,2024,38(2):362-372.
JIANG Daiqin, LI Pingping, ZOU Huayao. Characteristics of Natural Fractures and Their Influence on Oil and Gas Enrichment and Preservation of the Jurassic Continental Shale in the Yuanba Area, Northeastern Sichuan Basin[J]. Geoscience, 2024, 38(2): 362-372.
- [21] 杜晓宇,金之钧,曾联波,等.鄂尔多斯盆地陇东地区长7页岩油储层天然裂缝发育特征与控制因素[J].地球科学,2023,48(7):2589-2600.
DU Xiaoyu, JIN Zhijun, ZENG Lianbo, et al. Development characteristics and controlling factors of natural fractures in Chang 7 shale oil reservoir, Longdong Area, Ordos Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(7): 2589-2600.
- [22] ZENG L B, LYU W Y, LI J, et al. Natural fractures and their influence on shale gas enrichment in Sichuan Basin, China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 30: 1-9.
- [23] 齐荣,朱峰,何发岐,等.鄂尔多斯盆地麻黄山西地区三叠系延长组7段页岩油储层特征及控制因素[J].石油实验地质,2025,47(4):791-804.
QI Rong, ZHU Feng, HE Faqi, et al. Characteristics and controlling factors of shale oil reservoirs in the seventh member of Triassic Yanchang Formation, western Mahuangshan area, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2025, 47(4): 791-804.
- [24] 顾天甫,孙豪飞,张雪莹,等.川东地区吴家坪组页岩储层孔隙结构及发育控制因素[J].断块油气田,2025,32(1):1-9.
GU Tianfu, SUN Haofei, ZHANG Xueying, et al. Pore structure and development control factors of shale reservoirs in Wujiaping Formation, eastern Sichuan Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2025, 32(1): 1-9.
- [25] 熊健,吴俊,刘向君,等.陆相页岩储层地质力学特性及对压裂效果的影响[J].西南石油大学学报(自然科学版),2023,45(5):69-80.
XIONG Jian, WU Jun, LIU Xiangjun, et al. The geomechanical characteristics of the continental shale reservoirs and their influence on the fracturing effect[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2023, 45(5): 69-80.
- [26] 闫怀荣,蒲三龙,魏江伟,等.姬塬油田高强度压裂改造工艺技术研究[J].石油化工应用,2017,36(4):84-88.
YAN Huairong, PU Sanlong, WEI Jiangwei, et al. Study on high strength fracturing technology in Jiyuan oilfield[J]. Petrochemical Industry Application, 2017, 36(4): 84-88.
- [27] 叶亮,李宪文,马新星,等.不同脆性致密砂岩裂缝扩展规律实验[J].新疆石油地质,2020,41(5):575-581.
YE Liang, LI Xianwen, MA Xinxing, et al. Experiments on hydraulic fracture propagation in tight sandstones with different brittleness[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(5): 575-581.
- [28] 王道军,陈超,刘珠江,等.四川盆地复兴地区侏罗系纹层型页岩油气富集主控因素[J].石油实验地质,2024,46(2):319-332.
WANG Daojun, CHEN Chao, LIU Zhujiang, et al. Main controlling factors for oil and gas enrichment in Jurassic laminated shale in Fuxing area of Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(2): 319-332.
- [29] 刘绪钢,李国锋,李雷,等.页岩油储层压裂液渗吸驱油机理研究[J].油气藏评价与开发,2024,14(5):756-763.
LIU Xugang, LI Guofeng, LI Lei, et al. Imbibition displacement mechanism of fracturing fluid in shale oil reservoir[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(5): 756-763.
- [30] 庞小娇.古龙页岩油储层纹理岩石物理响应机理及测井表征方法研究[D].北京:中国石油大学(北京),2023.
PANG Xiaojiao. Petrophysical response mechanism and logging evaluation of shale oil reservoirs in the gulong sag, Songliao basin, China[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.
- [31] 储超群.层理岩石变形行为与破裂演化机制研究[D].北京:北京科技大学,2024.
CHU Chaoqun. Experimental study on deformation behavior and failure evolution mechanisms of layered rock[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2024.

- [32] 姚红生, 宋宗旭, 唐建信, 等. 苏北盆地溱潼凹陷页岩油SD1井万吨级CO₂压吞矿场试验及效果评价[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2023, 38(5): 50-57.
YAO Hongsheng, SONG Zongxu, TANG Jianxin, et al. Field test of 10000-ton CO₂ fracturing-huff-puff in shale oil well SD1, Qintong sag, Subei Basin and its effect evaluation[J]. Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition), 2023, 38(5): 50-57.
- [33] 张玉玺. 苏北及周缘下寒武统碳质页岩沉积模式及页岩气地质意义[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2019.
ZHANG Yuxi. Sedimentary model and geological significance of carbonaceous shale in the Early Cambrian, northern Jiangsu and its surroundings[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2019.
- [34] 段宏亮, 孙雅雄, 杨保良. 苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组二段页岩油富集主控因素[J]. 石油实验地质, 2024, 46(3): 441-450.
DUAN Hongliang, SUN Yaxiong, YANG Baoliang. Main controlling factors of shale oil enrichment in second member of Paleogene Funing Formation in Gaoyou Sag of Subei Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(3): 441-450.
- [35] 姚军, 王萌, 樊冬艳, 等. 考虑层理缝岩性差异的页岩油藏压裂水平井动态分析方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(5): 91-102.
YAO Jun, WANG Meng, FAN Dongyan, et al. Dynamic Analysis of Fractured Horizontal Wells in Shale Reservoirs Considering Lithological Differences of Bedding Fractures[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2024, 48(5): 91-102.
- [36] 钟志国, 于雯泉, 段宏亮, 等. 苏北盆地中低TOC复杂断块页岩油勘探进展与攻关方向[J]. 油气藏评价与开发, 2025, 15(1): 11-18.
ZHONG Zhiguo, YU Wenquan, DUAN Hongliang, et al. Progress and research direction of shale oil exploration in complex fault blocks with low to medium TOC in Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(1): 11-18.
- [37] 李庆辉, 李少轩, 刘伟洲. 深层页岩气储层岩石力学特性及对压裂改造的影响[J]. 特种油气藏, 2021, 28(3): 130-138.
LI Qinghui, LI Shaoxuan, LIU Weizhou. Rock mechanical properties of deep shale gas reservoirs and their influence on fracturing stimulation[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(3): 130-138.
- [38] 赵海波, 赵磊, 王团, 等. 松辽盆地古龙页岩油粘弹各向异性波场模拟及其响应特征研究[J]. 石油物探, 2025, 64(4): 716-726.
ZHAO Haiibo, ZHAO Lei, WANG Tuan, et al. Investigation of viscoelastic anisotropy in wavefield simulations and their response characteristics for Gulong shale oil within the Songliao basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2025, 64(4): 716-726.
- [39] 刘剑, 邵振宝, 付京斌, 等. 压裂路径对水力压裂裂纹扩展影响试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2024, 41(6): 8-17.
LIU Jian, SHAO Zhenbao, FU Jingbin, et al. Experimental study on the influence of hydraulic fracturing path on crack propagation of hydraulic fracturing[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2024, 41(6): 8-17.
- [40] 钟庆良, 石秀平, 孙树林. 基于地震反演技术的地应力建模方法在江汉新沟嘴组页岩油中的应用[J]. 石油物探, 2024, 63(2): 472-486.
ZHONG Qingliang, SHI Xiuping, SUN Shulin. In-situ stress modeling based on seismic inversion in Xingouzui shale oil prediction, Jianghan Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2024, 63(2): 472-486.
- [41] 李超, 罗涛, 黄亚浩, 等. 苏北盆地高邮凹陷花页1井古近系阜宁组裂缝脉体流体演化及其对页岩油充注过程的指示意义[J]. 石油实验地质, 2024, 46(2): 228-237.
LI Chao, LUO Tao, HUANG Yahao, et al. Fluid evolution of fracture veins of Paleogene Funing Formation in well HY1 in Subei Basin and implications for shale oil filling[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(2): 228-237.
- [42] 张焯, 潘林华, 周彤, 等. 页岩水力压裂裂缝扩展规律实验研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(5): 11-16.
ZHANG Ye, PAN Linhua, ZHOU Tong, et al. A study of hydraulic fracture propagation for shale fracturing[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(5): 11-16.
- [43] 张学平, 刘友权, 张鹏飞, 等. 大川中沙溪庙致密砂岩储层支撑裂缝导流能力的影响因素[J]. 石油与天然气化工, 2024, 53(3): 92-97.
ZHANG Xueping, LIU Youquan, ZHANG Pengfei, et al. Influencing factors of the fracture conductivity of propped cracks in the Shaximiao tight sandstone reservoir in central Sichuan[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2024, 53(3): 92-97.
- [44] 邸士莹. 致密油藏注水裂缝扩展机理及有效开发方式研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
DI Shiyang. Study on the propagation mechanism and effective development methods of waterflood-induced fractures in tight reservoirs[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.
- [45] 冯雪磊, 马凤山, 赵海军, 等. 断层影响下的页岩气储层水力压裂模拟研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 751-763.
FENG Xuelei, MA Fengshan, ZHAO Haijun, et al. Numerical simulation of hydraulic fracturing in shale gas reservoirs under fault influence[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(3): 751-763.
- [46] 刘晓. 不同压裂规模下煤层缝网形态对比研究: 以延川南煤层气田为例[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(3): 510-518.
LIU Xiao. Comparison of seam network morphology in coal reservoirs under different fracturing scales: A case of Yanchuannan CBM Gas Field[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(3): 510-518.
- [47] 赵海峰, 王成旺, 席悦, 等. 深层煤层水平井压裂动态应力场研究: 以鄂尔多斯盆地大宁一吉县区块为例[J]. 油气藏评价与开发, 2025, 15(2): 310-323.
ZHAO Haifeng, WANG Chengwang, XI Yue, et al. Study on dynamic stress field of fracturing in horizontal wells of deep coal seams: A case study of Daning-Jixian block in Ordos Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(2): 310-323.
- [48] 罗攀, 张国新, 乔红军, 等. 鄂尔多斯盆地长7页岩油压裂工程“甜点”综合评价: 以吴起地区吴66井、吴67井和吴213井为例[J]. 非常规油气, 2025, 12(4): 100-108.
LUO Pan, ZHANG Guoxin, QIAO Hongjun, et al. Optimization method of fracturing engineering “sweet spot” for Chang7 shale oil, Ordos Basin: A case study of wells WU66, WU67 and WU213 in Wuqi area[J]. Unconventional Oil & Gas, 2025, 12(4): 100-108.
- [49] 谢宾, 曾凌翔, 李彬, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田深层煤层气直井压裂实践与认识[J]. 天然气勘探与开发, 2024, 47(6): 45-52.
XIE Bin, ZENG Lingxiang, LI Bin, et al. Practice and understanding of vertical well fracturing for deep CBM reservoirs in Sulige gasfield, Ordos Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2024, 47(6): 45-52.
- [50] 张磊, 张义平, 陈奕羲, 等. 压裂裂缝对页岩储层压力影响模拟研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(6): 69-71.
ZHANG Lei, ZHANG Yiping, CHEN Yixi, et al. Simulation study on effect of fracturing fracture on shale reservoir pressure[J]. Coal Technology, 2017, 36(6): 69-71.