

古龙页岩力学特征与裂缝扩展机理

刘合¹, 孟思炜¹, 王素玲², 董康兴², 杨柳³, 陶嘉平¹, 梁立豪¹

[1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 东北石油大学, 黑龙江 大庆 163318; 3. 中国矿业大学(北京), 北京 100083]

摘要:古龙页岩油是中国对纯页岩型页岩油规模化勘探开发的首次探索。明确古龙页岩岩石力学特征与裂缝扩展机制,对指导古龙页岩油工程靶体优选、压裂工艺设计与施工参数优化具有重要意义。在对古龙页岩开展矿物分布、薄片及岩石力学测试分析的基础上,明确了古龙页岩“千层小薄饼”力学特征,分析了地质-工程多因素控制下的裂缝扩展机理。结果显示,古龙页岩具有黏土矿物含量高(平均为46.6%)、储集层塑性强、页理发育程度高及力学各向异性强的典型特征。与常规页岩脆性断裂存在显著不同,古龙页岩典型岩样力学性质表现出高频波动特征,抗压强度大于20 MPa的波动次数为3.33次/cm,断裂过程呈渐进式的稳定破坏过程,具有缓慢的峰后跌落段,断裂轨迹表现为锯齿状随机路径。同时,在高密度页理缝的控制下,古龙页岩压裂裂缝形态复杂,但缝高和缝长受到明显抑制,人工裂缝“扩不高、延不远”,成为古龙页岩油储集层有效改造的主要制约。建议古龙页岩油压裂改造应遵循“控近扩远”原则,加强压裂施工过程控制,抑制近井裂缝过度发育,促进主裂缝充分延伸,提高有效改造体积。

关键词:力学特征;弹塑性;裂缝扩展;非均质性;页岩油;古龙页岩;松辽盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Mechanical characteristics and fracture propagation mechanisms of the Gulong shale

LIU He¹, MENG Siwei¹, WANG Suling², DONG Kangxing², YANG Liu³, TAO Jiaping¹, LIANG Lihao¹

[1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 3. China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: The Gulong shale oil represents China's first attempt at large-scale exploration and exploitation of the oil contained in shale sequences without intercalations. Clarifying the rock mechanical characteristics and fracture propagation mechanisms of the Gulong shale is vital for guiding the selection of landing zones and fracturing design and engineering parameter optimization. In this study, the mineral distribution, thin section observation and rock mechanics tests are performed to clarify the Gulong shale as “fine layered” texture in mechanics and reveal the fracture propagation mechanisms under the control of multiple geological and engineering factors. It is shown that the Gulong shale is characterized by high clay mineral content (Avg. 46.6%), strong plasticity, a foliation intensity of up to 1 000 ~ 3 000 stripes per meter and strong mechanical anisotropy. Unlike the brittle fracturing of conventional shale, the typical rock samples from Gulong exhibit high-frequency fluctuation in mechanical property, with a fluctuation frequency of 3.33 times per cm for a compressive strength greater than 20 MPa. The fracturing process is observed as a steady gradual process with a slow post-peak stress decline, and along a random path in a zigzagged shape. Meanwhile, in the case of high-density foliation fractures, the hydraulic fractures in the Gulong shale are of complex morphology, with their height and length being significantly constrained. The limited vertical and horizontal extension of hydraulic fractures has been a major constraint for the effective stimulation of the Gulong shale oil reservoir. It is thereby suggested that the hydraulic stimulation of the Gulong shale oil reservoir should follow the principle of controlling near-wellbore fracture branching and further extending distal fracture networks, while placing the fracturing treatment under more effective

收稿日期:2023-02-15;修回日期:2023-06-16。

第一作者简介:刘合(1961—),男,博士、中国工程院院士,低渗透油藏增产改造、机采系统提高系统效率、分层注水和井筒工程控制技术。

E-mail: liuhe@petrochina.com.cn。

通信作者简介:孟思炜(1988—),男,博士、高级工程师,非常规储层综合表征、可压性评价与高效开发技术。E-mail: mengsw@petrochina.com.cn。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52274058);黑龙江省揭榜挂帅项目(RIPED-2022-JS-1740, RIPED-2022-JS-1853)。

control to suppress the development of near-wellbore fractures and boost the extension of main fractures to sufficiently expand the stimulated reservoir volume.

Key words: mechanical characteristics, elastoplasticity, fracture propagation, heterogeneity, shale oil, Gulong shale, Songliao Basin

引用格式:刘合,孟思伟,王素玲,等. 古龙页岩力学特征与裂缝扩展机理[J]. 石油与天然气地质,2023,44(4):820-828. DOI:10.11743/ogg20230402.

LIU He, MENG Siwei, WANG Suling, et al. Mechanical characteristics and fracture propagation mechanisms of the Gulong shale[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 820-828. DOI: 10.11743/ogg20230402.

中国页岩油资源丰富,是重要的油气战略接替资源。目前已在准噶尔^[1]、鄂尔多斯^[2]、渤海湾^[3]、柴达木^[4]等重点盆地取得突破,在部分页岩层系中的致密薄夹层甜点富集区取得了良好开发效果。然而,随着页岩油勘探开发逐渐步入规模化阶段,优质储层比例下降,页岩源内滞留油作为资源主体势必成为勘探开发重点对象^[5]。松辽盆地北部古龙页岩油是中国纯页岩型页岩油规模化勘探开发的首次探索,相较于北美海相沉积的页岩油储层,古龙页岩油发育有机和无机双重成因、由基质孔隙和页理缝组成的特殊储集系统,具有有机质成熟度高、原油黏度低、气/油比高、压力系数高的特征,改变了陆相页岩油普遍呈现高密度、高黏度、低气/油比特征的传统认识^[6]。古页岩油1井以白垩系青山口组一段下部纯页岩为靶层,突破了在页岩层系中开发致密夹层的传统理念,获得高产工业油流,揭示了其巨大的资源潜力,但仍难以达到经济动用门槛^[7]。如何实现该类页岩油藏的规模化效益开发是亟待解决的关键问题。

水平井多级多簇压裂形成大规模复杂裂缝网络是页岩油有效开发的关键^[8-11]。区别于以致密薄夹层甜点富集区为靶体的夹层型页岩油藏,古龙页岩岩相厚度占比超过90%,黏土矿物含量高,储层塑性强,并具有强非均质性特征^[12]。岩心精描显示,古龙页岩水平页理缝极为发育,每米约几百至数千条,对水力压裂裂缝扩展产生重要影响^[6]。水力裂缝遇到页理可能产生贯穿、转向、终止或阶梯式延伸等形态,从而导致最终裂缝网络形态极强的不确定性^[13-14]。因此,明确古龙页岩高黏土矿物含量和强非均质性特征控制下的力学特性,科学认识可压性特征,阐明水力压裂裂缝扩展机理,指导古龙页岩油工程靶体优选、压裂工艺设计与施工参数优化,具有重要理论意义和应用价值^[15]。

1 样品与研究方法

岩心库岩心精描与前期样品分析显示,古龙凹陷

青山口组页岩主要包括长英质纹层状页岩、混合质纹层状页岩以及黏土质页岩等3类主要岩相,在地层中占比超过90%。在此基础上,本文在古龙凹陷A井和B井的青山口组页岩层系中进行针对性取样,样品覆盖青山口组的3类主要岩相,具有代表性。

研究中的主要实验手段包括:

1) 为明确待测样品矿物组成特征,使用日本理学公司 Rigaku D/max 2500 PC 型 X 射线衍射仪分析样品矿物组成特征,将样品加工为粒径 125 ~ 150 μm 的粉末后加入样品槽内,仪器以 $1^\circ/\text{min}$ 的速率,在 $3^\circ \sim 85^\circ$ 的范围内收集衍射数据,根据谱图分析样品矿物组成。

2) 为获取样品矿物分布特征,使用 FEI 公司 QEMSCAN 650F 矿物识别分析系统获取样品矿物组成、结构与分布特征,样品平面尺寸为 $1\,500\,\mu\text{m} \times 3\,000\,\mu\text{m}$,扫描电子显微镜的电压为 5 ~ 35 kV,束流为 0.78 pA ~ 26 nA,扫描精度为 1.5 μm 。

3) 为得到待测样品结构非均质性特征,利用德国 Zeiss 偏光显微镜,对 30 μm 厚的岩石薄片进行透射光观察,观察岩石矿物类型、形态和分布。

4) 为获取待测样品的力学非均质性特征,使用自主研发的 HADHJ-25/100-IV 型页岩划痕测量实验装置,测定页岩样品的力学性能纵向连续分布特征。样品为半圆柱岩心,尺寸为 Φ (直径) 100 mm $\times$ (50 ~ 500) mm,测试刀片宽度为 2 ~ 8 mm,深度测量范围为 0 ~ 1 mm,水平移动范围为 0 ~ 500 mm。

5) 为明确待测样品的岩石力学特征,开展岩心三轴实验测试,将样品加工为 Φ 25 mm $\times$ 50 mm 圆柱试样,根据取心位置地应力条件,在施加环向应力 39 MPa 条件下,轴向加载标准圆柱试件至破坏。

6) 为明确古龙页岩裂纹起裂与扩展特征,使用自主搭建的原位环境页岩断裂实验平台,将古龙页岩制备为 Φ 70 mm 的半圆盘标准试样,并在试件表面喷涂均匀的随机散斑点,实验过程采用数字图像技术以 25 帧/s 的速率记录古龙页岩断裂全过程,通过散斑图像后处理分析古龙页岩断裂特征。

7) 为明确古龙的裂缝机理,借助 RFPA 数值模拟软件^[16-17],构建非均匀页岩渗流-应力-损伤耦合数值模型,揭示压裂作用下的矿场尺度页岩的破坏机制,明确水力裂缝的扩展过程以及页理对裂缝扩展的影响。

2 “千层小薄饼”结构控制下的古龙页岩力学特征及断裂机制

与常规储层不同,古龙页岩具有复杂储层特征。古龙页岩发育长英质、混合质和黏土质等多类纹层结构及页理缝,具有复杂形态特征(图1)。长英质纹层呈波状-透镜状顺层分布,局部见液化砂脉、球枕构造等,在长英质纹层内部具有下粗上细的正韵律。混合质纹层顺层分布,相对较平直,主要由介形虫壳体组成,含部分长英质颗粒,介形虫壳体主要为单瓣,呈叠瓦状排列。黏土质页岩整体相对均一,几乎无纹层,内部长英质颗粒以黏土级粒径为主,相对孤立分布于黏土矿物颗粒之中。其原因是,古龙页岩形成于淡水-微咸水封闭静水深湖环境,发育低密度浊流,形成多类岩相和纹层结构,并发育页理;同时,深湖絮凝状波纹迁移等复杂搬运方式,形成叠置交错纹层,再经压实和成岩作用,呈现了“千层小薄饼”式岩石结构。传统评价方法难以综合考虑页岩组分及结构的双重非均质特

征对力学行为的影响^[18-19]。本文创新利用多尺度数字岩心表征和力学测试方法,探索古龙页岩的非均质力学特征及破坏机理。

2.1 矿物组构特征

将古龙青山口组、陇东延长组、吉木萨尔芦草沟组和沧东孔店组页岩样品分别进行X射线衍射全岩矿物分析(图2)。结果显示,青山口组页岩样品黏土矿物发育,含量主体介于30.1%~60.3%,平均为46.6%,是主要的组成矿物。对比延长组(30.7%)、芦草沟组(16.0%)和孔店组(13.9%)页岩样品,古龙青山口组页岩具有典型的黏土高度发育特征。不同类型的古龙页岩中,黏土质页岩的黏土矿物更为发育,平均含量为53.2%;长英质纹层状页岩及混合质纹层状页岩的黏土矿物相对较少,平均含量分别为41.9%和40.3%。

除黏土矿物外,古龙页岩石英和长石类等脆性矿物含量也较高,平均达到44.9%。其中石英矿物含量稳定,整体介于25.0%~35.0%。但高脆性矿物含量并不代表古龙页岩具有较好的脆性特征。图3展示了古龙页岩3种主要岩相样品的矿物组成与分布图像,可以看出,古龙页岩石英矿物在成因与形态方面存在较大差异。长英质纹层状页岩及混合质纹层状页岩中,石英来源以陆源碎屑为主,颗粒大、呈次棱角状、成层分布,对可压性贡献较大(图3a,b);而在黏土质页岩中,石英以自生硅质为主,颗粒小、呈星点状、包裹于黏土矿物中,对可压性贡献较小,扩缝与保持困难(图3c)。因此,应对不同成因、产状的石英矿物加以区分,准确评估矿物组构对可压性的影响。

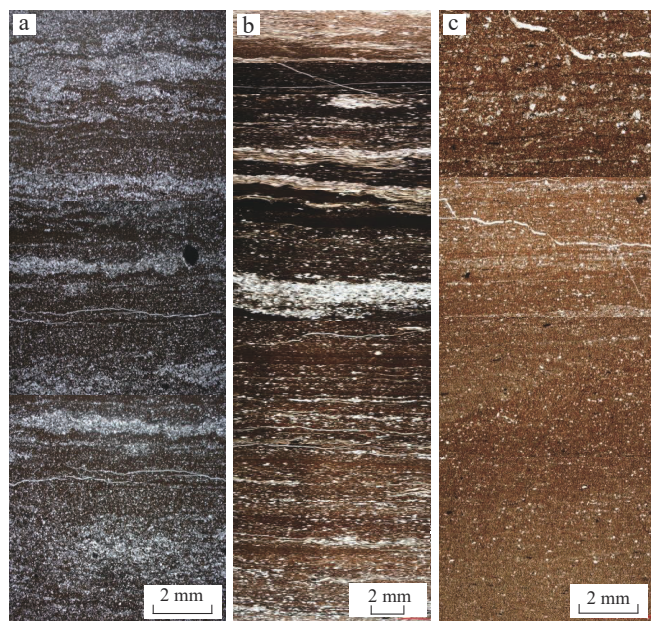


图1 松辽盆地古龙页岩样品岩石薄片显微图像

Fig. 1 Thin section analysis of the samples from Gulong shale in the Songliao Basin

a. 长英质纹层状页岩,埋深2 492.1 m; b. 混合质纹层状页岩,埋深2 450.2 m; c. 黏土质页岩,埋深2 492.9 m

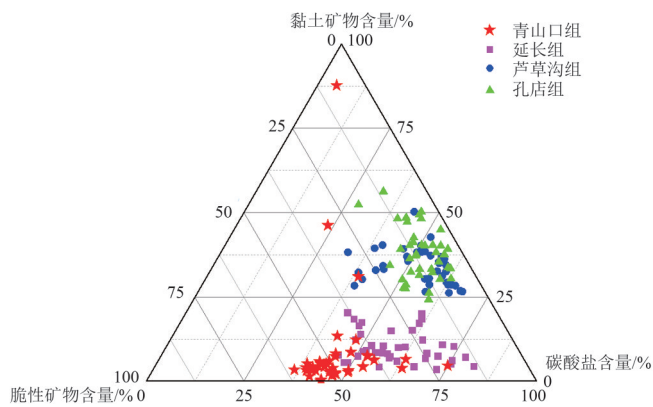


图2 青山口组、延长组、芦草沟组和孔店组页岩样品矿物组成三角图

Fig. 2 Ternary diagram showing the mineral composition of shale samples from Qingshankou, Yanchang, Lucaogou and Kongdian formations

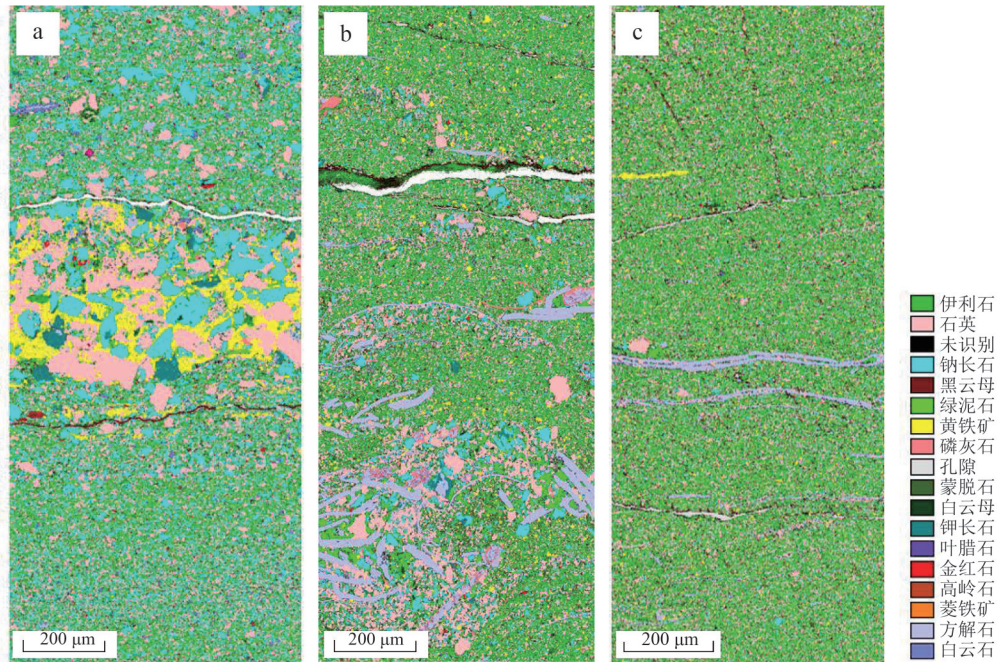


图3 松辽盆地古龙页岩矿物组成与分布特征

Fig. 3 Mineral composition and distribution of samples from the Gulong shale in the Songliao Basin

a. 长英质纹层状页岩,埋深2 450.0 m,石英含量34%;b. 混合质页岩,埋深2 501.3 m,石英含量29%;c. 黏土质页岩,埋深2 352.6 m,石英含量33%

2.2 非均质力学特征

为评估“千层小薄饼”结构对古龙页岩力学特性的影响(图4),使用自主研发的页岩划痕测量实验装置,对古龙页岩样品纵向剖面进行了岩石力学强度的连续测量,定量评估岩石力学性质非均匀分布特征,识别力学弱面(图5)。观察图5a样品划痕位置,发现整段划痕表面均可见清晰高频薄互层结构特征,划痕两侧出现大量破坏面,形成“丰”字形结构。测试样品的抗压强度也表现出高频波动特征(图5b),统计45 mm测试段中抗压强度振幅,5~10 MPa的波动次数为29次,平均6.44次/cm;10~20 MPa的波动次数为18次,平均4.00次/cm;大于20 MPa的波动次数为15次,平均

3.33次/cm。这说明古龙页岩在“千层小薄饼”结构控制下,其力学强度亦呈现高频旋回特征,很大程度上影响裂缝起裂与扩展行为,对传统可压性评价方法适用性带来了挑战。

2.3 弹塑性特征

为评估古龙页岩高黏土含量对弹塑性特征的影响,分别对古龙3种岩相典型页岩样品进行三轴实验,测得的应力-应变曲线如图6所示。可以看出,3类页岩的加载应力-应变曲线均有4个典型的加载阶段特征——裂纹闭合阶段、弹性阶段、裂纹稳定扩展阶段以及裂纹非稳定扩展阶段。3块样品均呈现出非常明显的塑性变形和残余变形特征,峰后应变软化现象显著,



图4 松辽盆地古页3HC井页岩岩心样品照片

Fig. 4 Photos of shale samples from Well Guye 3HC in the Songliao Basin

a. 埋深2 357.3 m;b. 埋深2 372.5 m;c. 埋深2 331.1 m

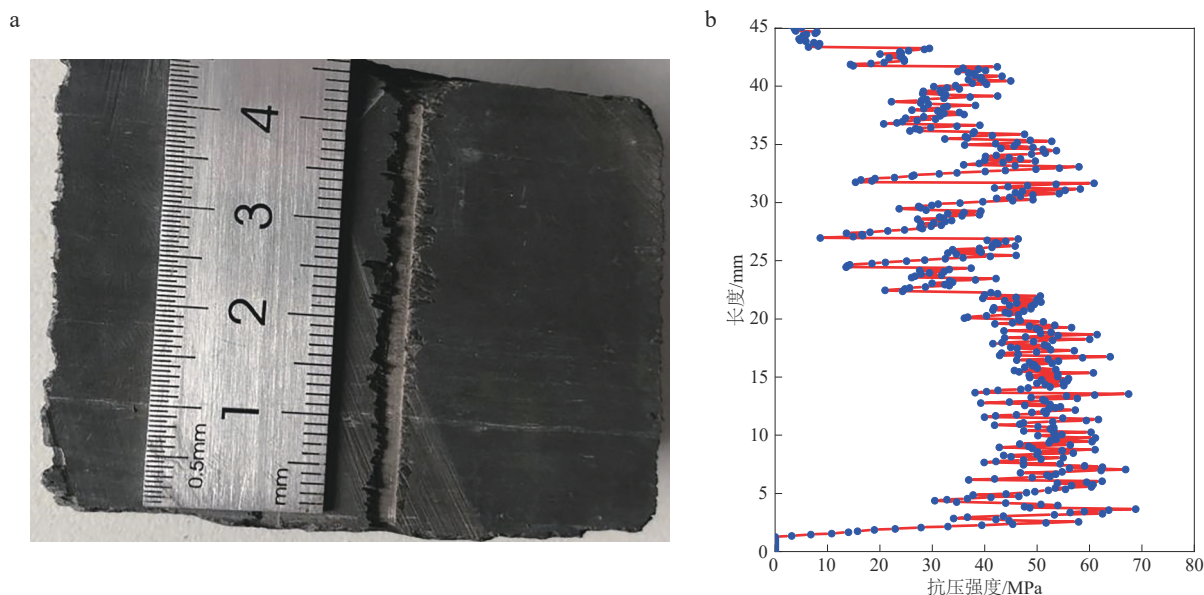


图5 松辽盆地古龙页岩划痕测试

Fig. 5 Scratch test of the Gulong shale in the Songliao Basin

a. 样品照片; b. 抗压强度分布特征

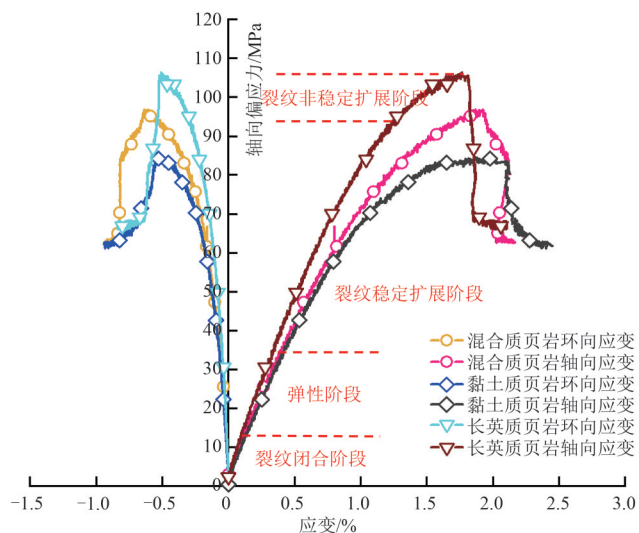


图6 松辽盆地古龙页岩三轴实验应力-应变曲线

Fig. 6 Triaxial stress-strain curve of the Gulong shale in the Songliao Basin

呈现强塑性特征。

计算得到长英质页岩、混合质页岩和黏土质页岩弹性模量分别为 13.284、12.702 和 8.419 GPa, 说明岩性对页岩的变形能力有显著的影响。其中黏土质纹层状页岩黏土矿物含量更高, 脆性石英矿物以自生石英为主, 其塑性特征最为显著; 同时页理缝等结构缺陷最为发育, 大幅降低了其力学强度, 峰值强度仅 88.42 MPa。长英质与混合质纹层状页岩黏土矿物相对不发育, 陆源石英矿物含量高, 脆性相对更好, 峰值强度同样高于黏土质页岩, 分别为 106.32 MPa 和 96.78 MPa。

2.4 层理结构对断裂特性作用机制

古龙页岩原位环境下的断裂破坏特征是影响储层造缝效果的关键因素。采用自主搭建的原位环境页岩断裂实验平台, 针对古龙页岩开展不同层理方向的断裂实验研究, 结合数字散斑测试技术, 捕捉页岩 I 型裂缝尖端应变演化规律, 如图 7 所示。基于数字图像技术处理得到的不同加载时刻试件表面水平应变场的可视化测试结果, 颜色由蓝至红的变化过程代表试件表面变形量由小到大的过程。通过应变场变化结果可以看出, 随着载荷的施加, 试件表面逐渐出现了应变集中带, 随后裂缝将沿应变集中带扩展。试验结果表明, 古龙页岩断裂轨迹表现为多次转折的随机路径, 不同于常规脆性页岩加载至峰值时的突然劈裂而形成单一直缝形态, 对比之下, 古龙页岩断裂演化过程相对稳定, 可捕捉到多次断裂过程, 裂缝形态更加复杂。

古龙页岩不同温度及层理角度下的断裂实验加载曲线如图 8 所示。由相同温度不同层理角度加载曲线可以看出 (图 8a), 受非均质页理、纹层结构的影响, 断裂过程呈渐进式的稳定破坏过程, 具有缓慢的峰后跌落段, 说明古龙页岩由较强塑性, 不同层理角度的古龙页岩具有各向异性, 断裂过程的力学响应曲线表现为锯齿状波动, 试验加载过程中产生大量类似“千层饼”折断的清脆响声, 与常规页岩脆性断裂呈现显著不同的特征。由图 8b—d 对比可以看出, 由于古龙页岩黏土含量高, 温度敏感性强, 不同层理角度下古龙页岩断

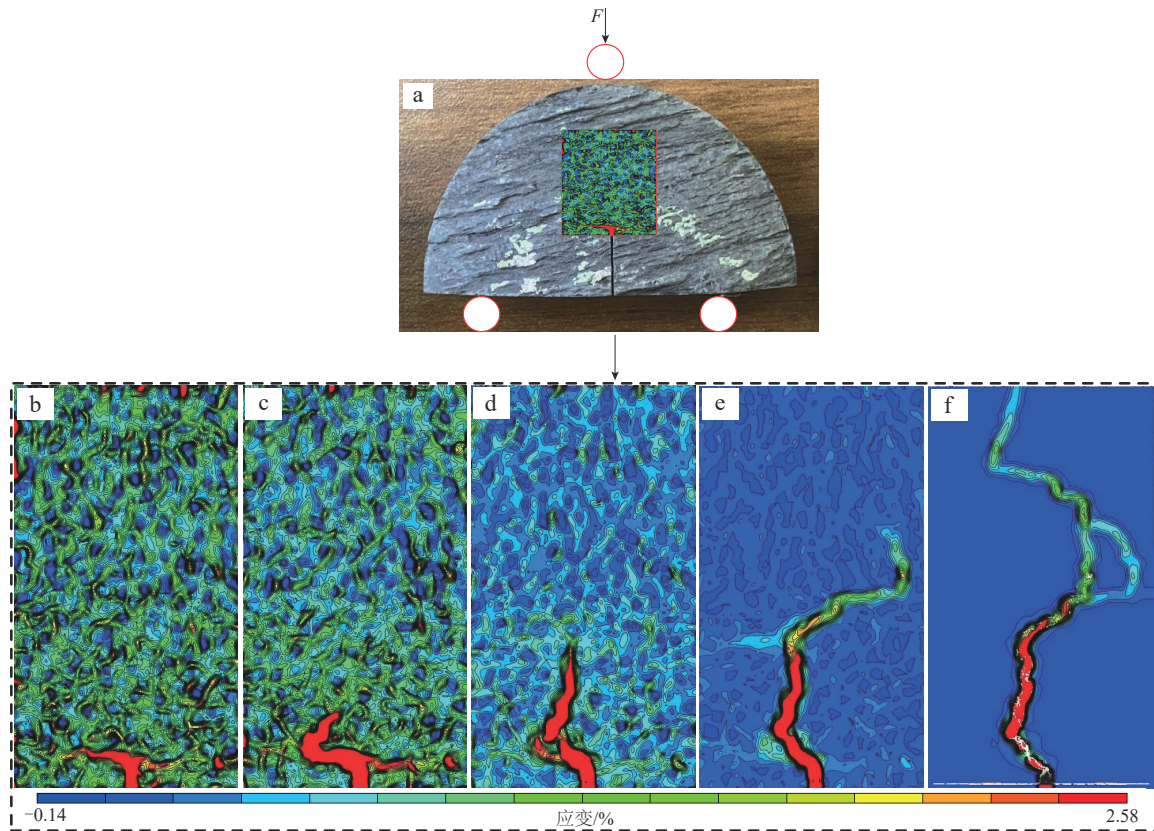


图7 松辽盆地古龙页岩断裂可视化测试结果

Fig. 7 Visualization results of the fracture behavior of the Gulong shale in the Songliao Basin

a. 试件受力条件; b. 峰前 80 %; c. 峰值载荷; d. 峰后 80 %; e. 峰后 60 %; f. 峰后 40 %

裂强度均随着温度升高而增大。

3 古龙页岩压裂裂缝扩展机理

鉴于页岩储层低孔、低渗的特征,单一裂缝难以实现储层的高效开发^[20],体积压裂技术被提出并广泛应用于页岩储层压裂施工中以提高裂缝复杂形态^[21-22]。对于层理、天然裂缝发育的页岩气储层,其岩性差异大、储层叠置且微裂缝发育程度低,难以形成复杂裂缝网络的页岩油储层,水力主裂缝激活层理或天然裂缝是形成复杂裂缝的主控因素^[23],需从地质条件和施工参数两方面提高水力裂缝激活层理或天然裂缝扩展能力以提高裂缝复杂程度^[24]。

为进一步研究古龙页岩的压裂裂缝扩展机理,设计了如下水力压裂数值模型。模型尺寸为:24 m×8 m×8 m,层理间距为0.4 m,X,Y和Z轴方向地应力分别为40,44和56 MPa,排量为7.68×10⁻³ m³/s滑溜水压裂液,黏度为1 mPa·s,模型如图9所示,物理参数设置如表1所示。

图10展示了古龙页岩油渗流-应力-损伤耦合数值

模型裂缝扩展模拟结果,通过最小主应力图来展示水力压裂中裂纹的扩展过程,显示其具有“页理控缝高”特殊压裂造缝机制。在压裂开始阶段,层理处出现了拉应力集中。裂缝主要沿垂直于水平小主应力方向扩展,在缝高和缝长方向扩展速度相近;随后裂缝在垂向扩展过程中遇到水平层理弱面,弱面随即发生破坏,形成“T”型裂缝;主裂缝在弱层位置产生分支,或直接转向在层理内部扩展,“T”型裂缝长度和开度逐渐增大,直到遇到基质;基质内应力逐渐累积,发生破坏,“T”型结构不再维持,主裂缝继续在前方基质中扩展,逐渐接近下一弱层;重复这一过程,最终形成“丰”字形复杂裂缝网络。

在“千层小薄饼”结构和“页理控缝高”特殊机制控制下,结合两向应力差较小的优越条件,为体积压裂形成复杂缝网提供了有利条件(图11)。现场实践显示,古龙页岩油水力压裂停泵压力梯度,介于0.024~0.031 MPa/m,进一步证实了古龙页岩油具有复杂水力裂缝特征^[25]。但应认识到,复杂人工裂缝是一把双刃剑,在泵注能量与造缝效率一定的条件下,高裂缝复杂度也意味着改造体积相对受限。考虑到古龙页岩特殊层理结构及具有强塑性特征,进一步抑制了裂缝有效

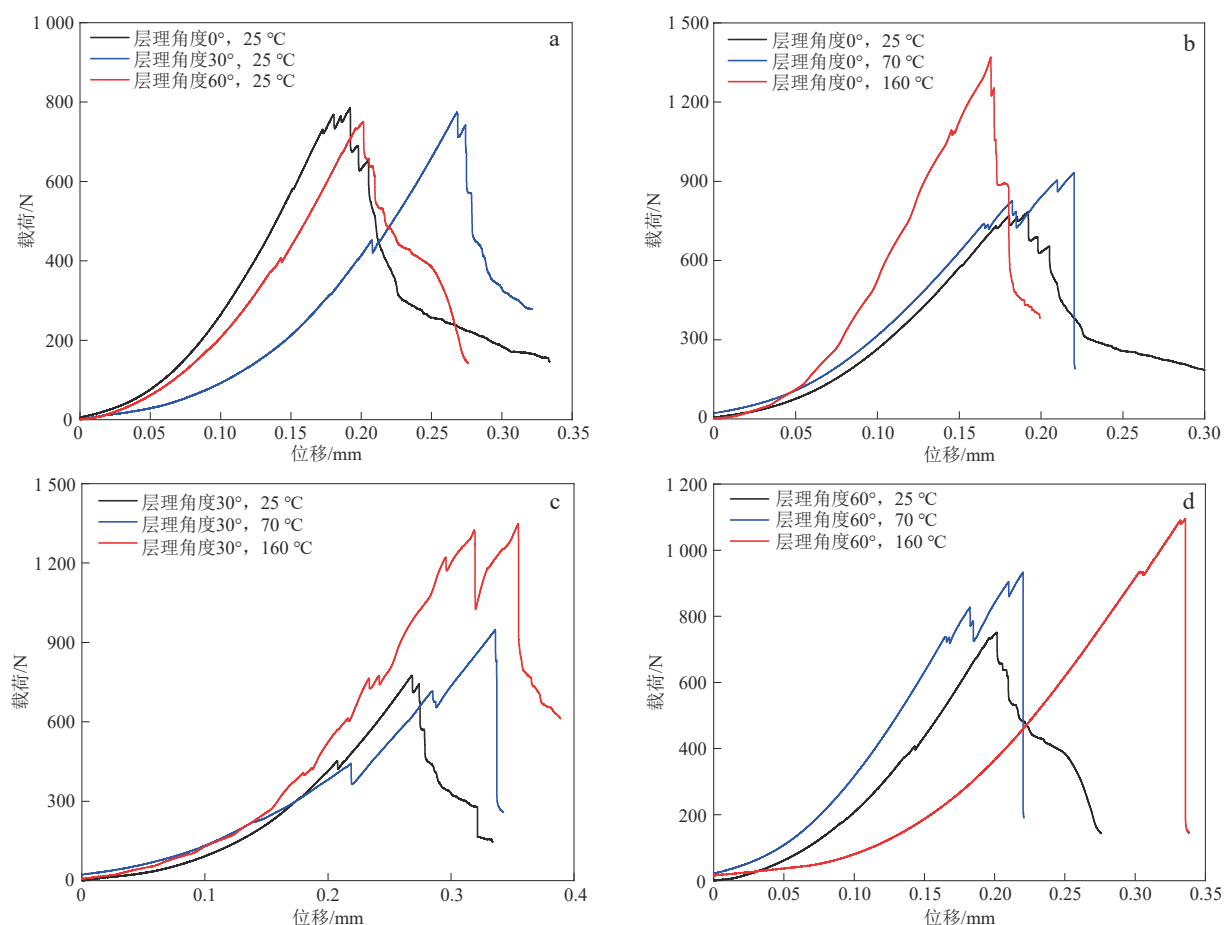


图8 松辽盆地古龙页岩断裂实验加载曲线

Fig. 8 Loading curve of fracturing experiment for the Gulong shale in the Songliao Basin

a. 常温条件下不同层理角度对比; b. 层理角度0°条件下不同温度对比; c. 层理角度30°条件下不同温度对比; d. 层理角度60°条件下不同温度对比

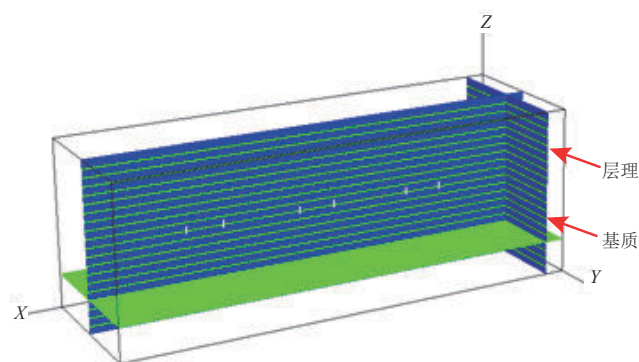


图9 水力压裂数值模型

Fig. 9 Sketch diagram showing the hydraulic fracturing numerical model
(绿色表示层理, 蓝色表示页岩基质。)

表1 水力压裂数值模型物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters for the hydraulic fracturing numerical model

材料	均质性系数	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	渗透率/ μm^2
基质	8	18	90	10^{-5}
层理	8	12	60	10^{-4}

扩展能力,导致裂缝“扩不高、延不远”成为压裂开发的主要制约。现场监测结果显示,当前压裂工艺条件下,已暴露出近井裂缝过度发育、主缝延伸受限、加砂难度高等一系列问题^[26]。压裂支撑裂缝高度普遍低于10 m,改造体积仅约为同规模致密油藏的40%^[6]。

针对古龙页岩油藏压裂改造难点,建议采用“控近扩远”的压裂设计理念,从射孔参数、射孔工艺、施工规模、液体体系、泵注程序和支撑剂组合等方面,加强压裂施工过程控制,抑制近井裂缝过度发育,促进主裂缝充分延伸,增大压裂有效改造体积。

4 结论与展望

1) 对比已报道的国内外页岩油藏,古龙页岩黏土矿物含量平均高达46.6%,储层塑性强;页理发育程度高、纹层结构高度发育且形态复杂,具有“千层小薄饼”特征。

2) 古龙页岩划痕两侧出现大量破坏面,形成“丰”

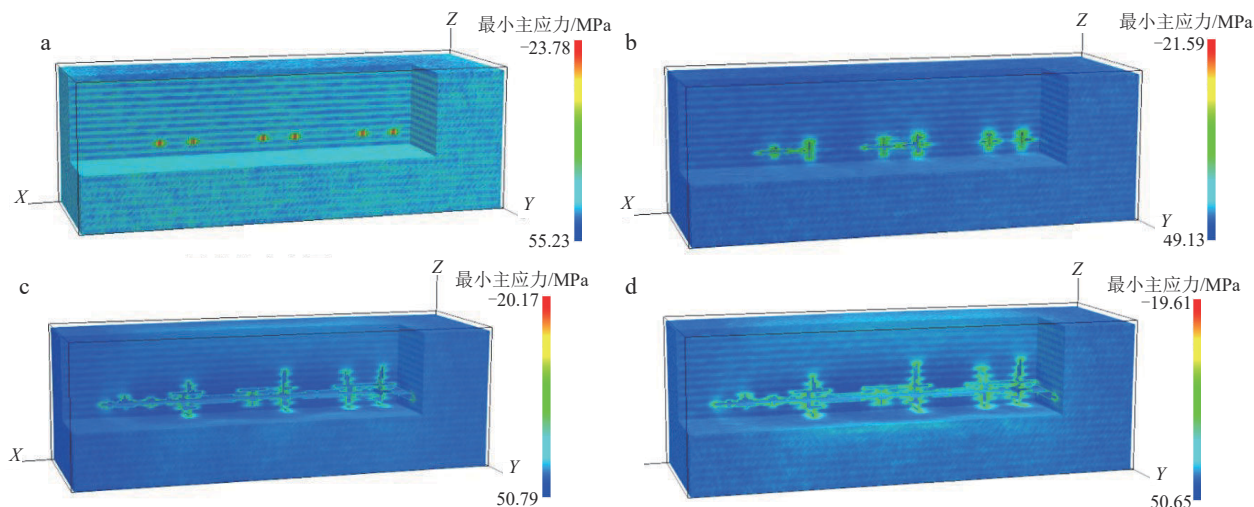


图10 松辽盆地古龙页岩油藏水力裂缝扩展过程

Fig. 10 Sketch diagram showing the propagation process of the hydraulic fracture system of Gulong shale reservoir, Songliao Basin

a. 加载步 50 步; b. 加载步 100 步; c. 加载步 150 步; d. 加载步 200 步

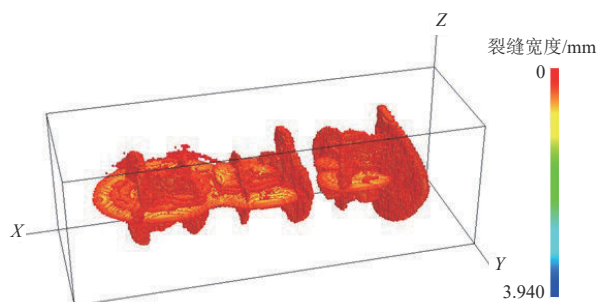


图11 松辽盆地古龙页岩油藏水力压裂三维裂缝形态

Fig. 11 Three-dimensional morphology of the hydraulic fracture system of Gulong shale oil reservoir, Songliao Basin

字形结构,力学性质具有高频波动特征,典型岩样抗压强度大于20 MPa的波动次数为3.33次/cm。断裂过程呈渐进式的稳定破坏过程,具有缓慢的峰后跌落段,断裂轨迹表现为锯齿状随机路径,与常规页岩脆性断裂存在显著不同。

3) 高密度页理缝控制下,古龙页岩油压裂裂缝形态复杂,但缝高、缝长明显受抑制,结合储层塑性特征影响,人工裂缝扩不高、延不远,成为古龙页岩油储集层有效改造的主要制约。压裂设计须遵循“控近扩远”原则,控制近井裂缝复杂程度,强化主缝延伸,增加有效改造体积。

致谢:感谢黑龙江省揭榜挂帅项目“古龙页岩油相态、渗流机理及地质工程一体化增产改造研究”、“古龙页岩储层成岩动态演化过程与孔缝耦合关系研究”的资助及大庆油田院士工作站的帮助。

参 考 文 献

[1] 支东明,李建忠,张伟,等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷双吉构

造带井井子沟组勘探突破及意义[J]. 石油学报, 2022, 43(10): 1383-1394.

ZHI Dongming, LI Jianzhong, ZHANG Wei, et al. Exploration breakthrough and its significance of Jingjingzigou Formation in Shuangji tectonic zone of Jimsar Sag in Junggar Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(10): 1383-1394.

[2] 付金华,李士祥,牛小兵,等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油地质特征与勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 870-883.

FU Jinhua, LI Shixiang, NIU Xiaobing, et al. Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 870-883.

[3] 周立宏,何海清,郭绪杰,等. 渤海湾盆地歧口凹陷古近系沙一下亚段中等成熟页岩油富集主控因素与勘探突破[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1073-1086.

ZHOU Lihong, HE Haiqing, GUO Xujie, et al. Main factors controlling the medium-mature shale oil enrichment and exploration breakthrough in the Paleogene Lower E₃s^{1L} in Qikou Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1073-1086.

[4] 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.

[5] 刘合,匡立春,李国欣,等. 中国陆相页岩油完井方式优选的思考与建议[J]. 石油学报, 2020, 41(4): 489-496.

LIU He, KUANG Lichun, LI Guoxin, et al. Considerations and suggestions on optimizing completion methods of continental shale oil in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(4): 489-496.

[6] 孙龙德,刘合,何文渊,等. 大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 453-463.

SUN Longde, LIU He, HE Wenyuan, et al. An analysis of major scientific problems and research paths of Gulong shale oil in

- Daqing Oilfield, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 453–463.
- [7] 庞彦明, 王永卓, 王瑞, 等. 松辽盆地古龙页岩油水平井试采分析及产能预测[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(3): 137–146.
- PANG Yanming, WANG Yongzhuo, WANG Rui, et al. Production test analysis and productivity prediction of horizontal wells in Gulong shale oil reservoirs, Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(3): 137–146.
- [8] 刘成林, 刘新菊, 张洪军, 等. 鄂尔多斯盆地安塞地区页岩油地质-工程一体化技术实践[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1238–1248.
- LIU Chenglin, LIU Xinju, ZHANG Hongjun, et al. Application of an integrated geology-reservoir engineering approach to shale oil development in Ansai area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1238–1248.
- [9] LU Cong, LU Yunxiao, GUO Jianchun, et al. Stability of the formation interface under the impact of hydraulic fracture propagation in the vicinity of the formation interface [J]. *Petroleum Science*, 2020, 17(4): 1101–1118.
- [10] DONG Jingnan, YUAN Guangjie, WANG Xiangyang, et al. Experimental study of multi-timescale crack blunting in hydraulic fracture [J]. *Petroleum Science*, 2021, 18(1): 234–244.
- [11] ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, LIU Xuewei, et al. Numerical study of fracture dynamics in different shale fabric facies by integrating machine learning and 3-D lattice method: A case from Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 218: 110861.
- [12] 王玉华, 梁江平, 张金友, 等. 松辽盆地古龙页岩油资源潜力及勘探方向[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(3): 20–34.
- WANG Yuhua, LIANG Jiangping, ZHANG Jinyou, et al. Resource potential and exploration direction of Gulong shale oil in Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(3): 20–34.
- [13] ZHAO Peng, XIE Lingzhi, FAN Zhichao, et al. Mutual interference of layer plane and natural fracture in the failure behavior of shale and the mechanism investigation [J]. *Petroleum Science*, 2021, 18(2): 618–640.
- [14] LIU Xin, MENG Siwei, LIANG Zhengzhao, et al. Microscale crack propagation in shale samples using focused ion beam scanning electron microscopy and three-dimensional numerical modeling[J/OL]. *Petroleum Science*, 2023, 20, 1488–1512.
- [15] LABANI M M, REZAEE R. The importance of geochemical parameters and shale composition on rock mechanical properties of gas shale reservoirs: A case study from the Kockatea Shale and Carynginia Formation from the Perth Basin, western Australia [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(3): 1249–1257.
- [16] LI L C, TANG C A, WANG S Y, et al. A coupled thermo-hydrologic-mechanical damage model and associated application in a stability analysis on a rock pillar [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 34: 38–53.
- [17] LI Tianjiao, LI Lianchong, Tang Chun'an, et al. A coupled hydraulic-mechanical-damage geotechnical model for simulation of fracture propagation in geological media during hydraulic fracturing [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 173: 1390–1416.
- [18] 蒋廷学, 卞晓冰, 苏瑗, 等. 页岩可压性指数评价新方法及应用[J]. *石油钻探技术*, 2014, 42(5): 16–20.
- JIANG Tingxue, BIAN Xiaobing, SU Yuan, et al. A new method for evaluating shale fracability index and its application [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(5): 16–20.
- [19] 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.
- [20] 赵金洲, 尹庆, 李勇明. 中国页岩气藏压裂的关键科学问题[J]. *中国科学(物理学 力学 天文学)*, 2017, 47(11): 15–28.
- ZHAO Jinzhou, YIN Qing, LI Yongming. Key scientific issues of hydraulic fracturing in Chinese shale gas reservoir [J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2017, 47(11): 15–28.
- [21] 焦方正. 鄂尔多斯盆地页岩油缝网波及研究及其在体积开发中的应用[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1181–1188.
- JIAO Fangzheng. FSV estimation and its application to development of shale oil via volume fracturing in the Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1181–1188.
- [22] 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.
- [23] 柳占立, 王涛, 高岳, 等. 页岩水力压裂的关键力学问题[J]. *固体力学学报*, 2016, 37(1): 34–49.
- LIU Zhanli, WANG Tao, GAO Yue, et al. The key mechanical problems on hydraulic fracture in shale [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2016, 37(1): 34–49.
- [24] 史璨, 林伯韬. 页岩储层压裂裂缝扩展规律及影响因素研究探讨[J]. *石油科学通报*, 2021, 6(1): 92–113.
- SHI Can, LIN Botao. Principles and influencing factors for shale formations [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2021, 6(1): 92–113.
- [25] 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.
- [26] 闫鸿林, 段彦清, 范立华, 等. 松辽盆地古龙页岩油储层压裂施工诊断及工艺控制技术[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(3): 176–184.
- YAN Honglin, DUAN Yanqing, FAN Lihua, et al. Fracturing operation diagnosis and process control technology of the shale oil reservoirs in Gulong Sag, Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(3): 176–184.

(编辑 张玉银)