

蓄能压裂技术在低渗透油藏开发中的应用与优化研究

董娜, 刘磊, 苏政琦, 邵佩先, 杨增辉

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年2月19日; 录用日期: 2025年3月19日; 发布日期: 2025年5月6日

摘要

随着易于开采的油藏储量减少, 低渗透油藏开发成为了油气资源开采的重要方向。然而, 在低渗透油藏中, 由于渗透率较低和原油流动阻力较大, 传统的压裂技术存在压后地层能量降低快和产量递减迅速等问题。作为一种新型压裂方式, 蓄能压裂技术通过向地层注入大量蓄能流体来补充地层能量, 从而有效提升低渗透油藏的采收效率。本文系统介绍了蓄能压裂技术的机理、影响因素及应用现状, 重点分析了蓄能介质、蓄能液用量和焖井时间对压裂效果的影响, 探讨了该技术在提高油层采收率和老油田增产改造中的应用效果。研究表明, 蓄能压裂技术能够显著提升低渗透油藏的开发效率, 为油气资源的有效利用提供了新的技术途径。

关键词

蓄能压裂技术, 低渗油藏, 采收率

Research on the Application and Optimization of Energy-Storage Fracturing Technology in the Development of Low-Permeability Reservoirs

Na Dong, Lei Liu, Zhengqi Su, Peixian Shao, Zenghui Yang

School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Feb. 19th, 2025; accepted: Mar. 19th, 2025; published: May 6th, 2025

文章引用: 董娜, 刘磊, 苏政琦, 邵佩先, 杨增辉. 蓄能压裂技术在低渗透油藏开发中的应用与优化研究[J]. 矿山工程, 2025, 13(3): 415-422. DOI: 10.12677/me.2025.133046

Abstract

With the depletion of easily recoverable oil reserves, the development of low-permeability reservoirs has become a crucial direction for oil and gas resource extraction. However, in low-permeability reservoirs, traditional fracturing technologies face challenges such as rapid post-fracturing energy depletion and swift production decline due to low permeability and high crude oil flow resistance. As an innovative fracturing method, energy-storage fracturing technology addresses these issues by injecting substantial volumes of energy-storage fluids into the formation to replenish formation energy, thereby significantly enhancing the recovery efficiency of low-permeability reservoirs. This paper systematically elucidates the mechanisms, influencing factors, and current applications of energy-storage fracturing technology, with a particular focus on analyzing the impacts of energy-storage media, fluid volume, and well soaking time on fracturing effectiveness. It also explores the application outcomes of this technology in improving oil recovery rates and enhancing production in mature oilfields. Research indicates that energy-storage fracturing technology can markedly improve the development efficiency of low-permeability reservoirs, offering a novel technical pathway for the effective utilization of oil and gas resources.

Keywords

Energy-Storage Fracturing Technology, Low-Permeability Reservoirs, Recovery Efficiency

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在当代能源产业格局中，油气资源始终占据着举足轻重的地位，是驱动全球经济发展、保障社会生活有序运转的关键力量。过去数十年间，随着勘探与开采活动的持续深入，常规油藏呈现出日益枯竭的严峻态势。随着勘探技术的发展，越来越多原本隐匿于地层深处、渗透率较低的油藏逐渐被发现，称为低渗油藏[1]。低渗油藏在剩余可采储量中所占比例将越来越大，据中国石油新闻中心报道，当前剩余非常规油气探明可采储量为 1347.7 亿吨油当量[2]，低渗油藏正逐步成为未来油气供应的重要依仗[3]。

然而，低渗油藏因其储层孔喉结构复杂、原油边界层效应显著，导致其渗流特征呈现强非达西特征[4]。其渗透率低、原油流动阻力大，导致开采难度增大，采收率普遍偏低。传统压裂技术虽然能在一定程度上提高单井产能，但仍存在压后地层能量衰减快、产量递减明显等问题，难以实现油藏的高效开发。

针对上述问题，蓄能压裂技术应运而生。该技术将能量储存于地层中，增加裂缝与油藏的接触面积，提高渗吸驱油效率。其通过减缓压后地层能量的衰减速度，使油井产量在较长时间内保持相对稳定，实现压裂改造的目标的同时，使得难动用油气资源得到有效开发，显著提高油气井的产量和采收率，为低渗油藏的高效开发带来新的技术路径。

2. 蓄能压裂技术机理研究

蓄能压裂技术如图 1 所示，首先通过向目标井注入大量蓄能流体(如污水、滑溜水、CO₂ 等)以增加地层能量和造缝，然后再进行压裂。完成压裂后不立即反排，而是焖井一段时间，使得压裂液能够在基质中充分扩散，利用渗吸作用实现地层基质内的原油与裂缝中的压裂液互换，达到增能驱油的目的[5]。

与传统压裂方式相比，蓄能压裂方式具有以下优点[6]：

(1) 增加蓄能流体用量及注入速度可增加井区地层能量并改善该区注采关系，提高油藏的整体采收率，延长油藏的开发寿命；

(2) 蓄能流体的大量注入可使储层内部形成复杂裂缝网络，通过补充地层能量和优化裂缝网络，改善了原油的流动条件，渗流通道增大，储层改造区域增大，从而显著提高油气井的产量。

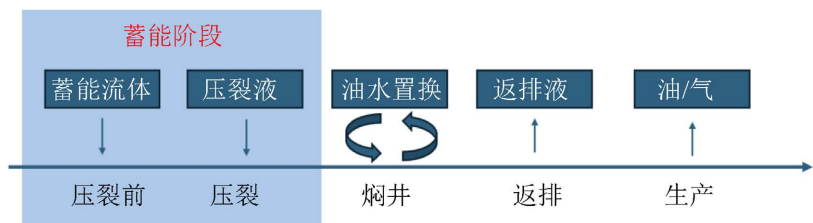


Figure 1. Schematic diagram of energy-storage fracturing technology

图 1. 蓄能压裂方式示意图

2.1. 能量补充

在进行蓄能压裂的过程中，大量的高压压裂液会被注入到地层中。依据达西定律，流体在多孔材料中的流动速度与其压力梯度是正相关的。因此，注入的高压流体在储层内会形成特定的高压区域，从而使压力开始向附近的地层传递。在该过程中，流体首先通过具有较高渗透率的通道或裂缝进行迅速地传导，然后逐步向渗透率较低的基质部分扩散，导致原本能量较低的区域的压力增加，将能量传输到地层的各个部分，从而补充地层的能量。

2.2. 裂缝改造

在低渗透储层中，通常存在天然裂缝或通过压裂等方法形成的人工裂缝。注入的高压流体有助于这些裂缝的进一步扩展和连通，使其能够进入到更细小分支和孔隙中，从而实现裂缝改造的目的。通过裂缝改造，不仅形成了更加复杂的裂缝网络，还扩大了裂缝的波及范围，从而提高油气资源的渗流通道和储存空间。

3. 蓄能压裂技术影响因素分析

3.1. 蓄能介质

蓄能压裂过程中，蓄能介质能够储存和释放能量，辅助地层产生裂缝并改善其渗透性。不同的蓄能介质具有不同的特性和作用机制，在低渗油藏开发中的应用也各有特点，以下是三种常用的蓄能介质：

(1) 污水

在油田开发的中后期阶段，采收率普遍大幅度降低，通常采取注水方式提高采收率，增产后期含水率极高，大部分中老油田含水率高达 80%，这些地层产出的污水具有杂质含量高、黏度低且滤失性强的特点，在蓄能压裂过程中，对形成复杂裂缝以及新的裂缝、提升压裂单井的增产效果有着显著的作用。具体而言，将大液量污水注入地层，井周围因外来低温液体造成温度变化，能有效减小水平方向的两向应力差，对形成复杂裂缝以及新的裂缝十分有利。此外，污水中的杂质颗粒具有类似暂堵的作用，能够提高裂缝内净压力，有助于形成新裂缝[6] [7]，如图 2 所示。微观层面而言，污水中天然有机质可形成动态界面膜，降低油水界面张力，增强毛细管自吸效应。污水中的 SiO_2 等纳米颗粒可通过吸附在岩石表面形成致密水膜，削弱油分子与岩石的吸附作用，提升驱油效率。研究表明，通过复配低界面张力纳米流

体, 可将界面张力降至 10^{-2} mN/m 数量级, 有效置换原油[8]。

基于以上机理, 王薇[9]曾开展室内实验, 对不同蓄能介质进行优选, 实验结果表明, 滑溜水和污水两种介质的液相岩心渗透率值相当, 但相比于滑溜水, 污水具有成本低、摩阻高、杂质含量高的优势。赵成琢[7]等也进行了污水蓄能压裂技术试验, 实现了储层近井部位的蓄能, 通过局部地区的应力改变, 从而产生了新裂缝, 实现增产。

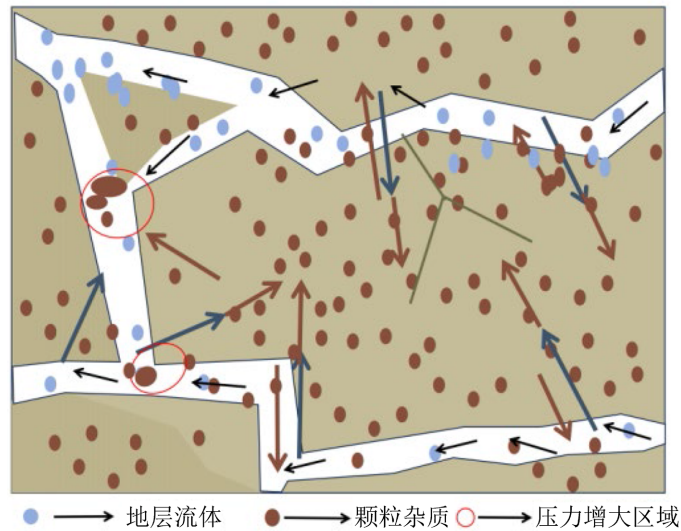


Figure 2. Schematic diagram of sewage pressurization mechanism
图 2. 污水增压机理示意图

(2) 滑溜水

滑溜水是经过特殊处理, 加入了减阻剂、防膨剂和表面活性剂等成分的一种活性水。这类添加剂能有效地减少流体的阻力, 同时增强其流动性和传输效率。在进行蓄能压裂操作时, 如图 3 所示, 滑溜水可以有效地促进微裂缝的形成, 从而构建一个更为复杂的裂缝网络, 以弥补注采井网存在的不足。除此之外, 滑溜水在为地层提供能量的同时, 也增强了储层岩石的亲水特性, 并在毛管力的吸水排油作用下实现了基质中的油水置换[10]。

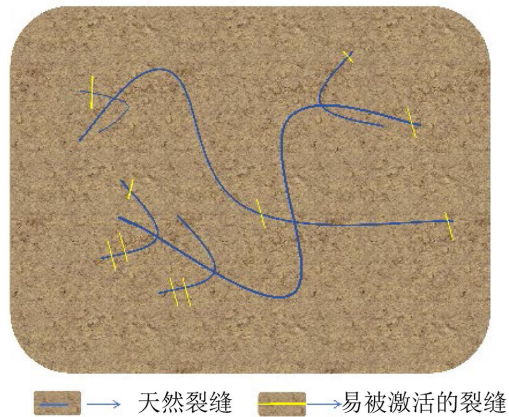


Figure 3. Schematic diagram of geological fissures
图 3. 地质裂缝示意图

微观层面而言,滑溜水中添加的高分子减阻剂(如聚丙烯酰胺类、生物基多糖、表面活性剂等)通过分子链的伸展与缠绕,降低流体流动时的湍流强度,能够使摩阻降低 50%~80%。这种低摩阻特性允许以更大排量注入压裂液,形成更复杂的缝网[11]。低粘度滑溜水注入时,储层裂缝以剪切破裂为主,裂缝延伸路径短、分叉多、密度高,显著扩大改造体积,提升驱油效率。

(3) CO₂

CO₂ 作为蓄能介质,能够有效提高储层能量,具有以下优势:具备优异的裂缝扩展能力,同时避免了水相残留和固体残渣的问题;对储层损害小,且能实现快速返排。CO₂ 注入后,在地层的高温高压下易处于临界态,易与原油形成混相,再气化和扩散期间溶于原油,促使原油体积大幅膨胀,萃取或气化其中的轻质成分,从而有效降低原油粘度、提升流动性,进而改善原油的物理性质并减少油水界面张力,提高采收率[10]。

微观层面而言,在高温高压条件下(温度高于 31.3℃,压力大于 7.38×10^6 Pa),CO₂ 可形成超临界流体(SC-CO₂),其黏度低(约 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ N s/m²)、扩散系数高(约 $10^{-1} \sim 10^{-4}$ cm²/s),能快速渗透至微小孔隙,扩大波及体积,如图 4 所示。此外,CO₂ 在储层降压时体积膨胀,从液态到气态体积增加约 600 倍,通过“气弹效应”持续驱动原油,弥补低渗储层能量不足的问题[12]。CO₂ 与原油达到混相后,可溶解原油中的轻质组分降低原油黏度,并消除油水界面张力,使得界面张力趋于零,实现“活塞式”驱替[13]。

基于以上机理,丁勇[14]等通过现场试验表明了蓄能压裂中的 CO₂ 有利于开启微裂缝、形成缝网。段永伟[15]等人通过室内实验发现,CO₂ 无水蓄能压裂技术能够为单井超前补充地层的能量。压裂完成后,地层的压力明显增加,还能减少原油的粘稠度,增强驱油的效率,使得储层的改造体积和裂缝的开启变得更为复杂。相比滑溜水,CO₂ 可以避免滑溜水的水锁效应和黏土膨胀问题,同时 CO₂ 可以滞留于储层中持续发挥驱油作用,实现碳封存与提高采收率双重目标。

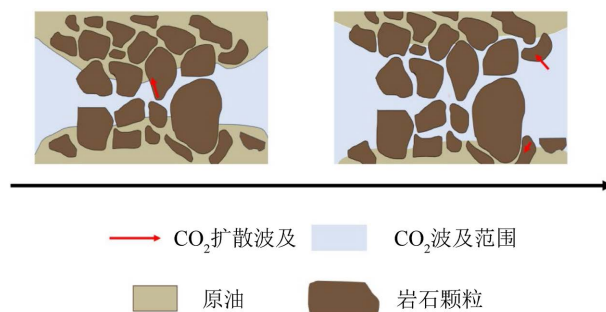


Figure 4. CO₂ diffusion diagram

图 4. CO₂ 扩散示意图

3.2. 蓄能液用量

蓄能液用量是进入地层用于岩石孔隙压力恢复和应力场改变的液体用量,影响着地层压力的恢复程度和应力的变化方向[6]。除此之外,合理的用量不仅可以提高裂缝扩展效果,还能增强地层能量补充。

王薇[9]通过物质平衡方程推导了由地层压力确定的合理蓄能液用量,具体公式如式(1)所示:

$$NpBo + WpBw - WiBw = NCeBOi\Delta P \quad (1)$$

式中: Np ——累产油量, 10^4 t;

Bo ——原油体积系数;

Wp ——累积产水量, 10^4 t;

B_w ——水体积系数;

W_i ——累积注水量;

N ——原始原油地质储量;

C_e ——综合压缩系数, 1/MPa;

BO_i ——原始原油体积系数;

P ——油藏地层压力, MPa。

潘文博[6]的实验研究揭示了蓄能液用量在地层压力恢复与裂缝转向中的关键作用。其研究发现, 在保持其他参数恒定的情况下, 增加蓄能液用量能显著提升地层压力的恢复程度及其影响范围, 从而增强蓄能效果。

具体而言, 根据有效应力原理, 地层有效应力公式为, $\sigma' = \sigma - p$ 。其中, σ' 为有效应力(作用于岩石骨架的净应力), σ 为上覆岩层压力, p 为孔隙压力(流体压力)。蓄能液量越大, 注入流体越多, 孔隙压力 p 升高越显著, 导致有效应力 σ' 降低, 从而延缓裂缝闭合, 提升地层能量保持水平。当蓄能液量超过 300 方时, 最大主应力方向的偏转程度随蓄能液量增加而增大, 这更有利于裂缝的转向与扩展。然而, 蓄能液用量并非越多越好, 经过闷井后井底压力多余的液体将扩散到地层深处, 因此需要根据储层物性参数和裂缝网络特征, 优化蓄能液量, 在保证能量补充效果的同时, 避免资源浪费和效率降低。

3.3. 焖井时间

油藏在进行蓄能压裂后, 焖井时间的长短对施工的效果有着重要的影响。选择合适的焖井时间可以减少抽后见油的返排率, 提高入地液的利用率, 并延长压裂措施的有效期[16]。具体而言, 适当延长焖井时间可以有效平衡储层压力和能量, 有助于保持裂缝的开启状态, 提高裂缝的导流能力; 此外, 在焖井的过程中, 由于渗吸作用的影响, 压裂液能在基质中有效地实现油水的置换, 这导致裂缝内的含水饱和度逐步下降, 而基质中的含水饱和度则逐步上升, 从而使原油在裂缝周围富集, 缩短了开井后的排液时间, 并快速见油[17]。但当焖井时间达到一定程度后, 渗吸速度会逐渐减缓, 继续延长焖井时间对油水置换效率的提升效果不再明显。

王金龙[17]等通过将关井蓄能过程合理关井时间转换为求解裂缝内压裂液渗流到基质岩块内部中心需要的时间来分析计算焖井时间。具体公式如下:

$$t = \frac{L^2 \mu}{K_m [(P_1 - P_2) - GL]} \quad (2)$$

式中: t ——流体由裂缝渗流到基质岩石的时间, s;

L ——裂缝到基质之间的距离, m;

μ ——流体黏度, mPa·s;

P_1 ——压裂后裂缝压力, Pa;

P_2 ——基质压力, Pa;

K_m ——基质渗透率, mD;

G ——地层启动压力, MPa/m。

王强[16]等人通过构建压裂-焖井-生产全过程的多相流模型, 以优化压后的焖井时间。研究表明, 随着焖井时间的延长, 产量呈先迅速上升后逐渐稳定的趋势。并且能通过累计产量增量的变化曲线中确定最佳焖井时间。

张相春[18]等人通过 Y 区块 5 口井物性参数、施工参数与对应合理焖井时间, 发现合理焖井时间与

油相黏度呈正相关,与基质区渗透率呈负相关,与储层改造区渗透率呈正相关,与毛管力大小呈强正相关关系。

4. 蓄能压裂技术的应用现状

4.1. 提高油层采收率

蓄能压裂技术在提高油层采收率方面的应用具有显著效果。主要通过补充地层能量、改善裂缝网络、改善储层物性等方式,从而提高油气的采收率。

2016年5月,吐哈油田进行了蓄能压裂的先导试验。研究区三塘湖采油厂的储层渗透性极低。使用传统的水平井压裂方法进行生产,存在着地层能量不足和产量快速下降的问题,影响着该区块的生产效益。在实施蓄能压裂技术之后,试验井的平均每日产量增加到了12.5吨,相较于压裂前的大约2吨,采收率有了显著的增长[19]。

A油田为低孔低渗的构造岩性油藏,采用常规压裂工艺开发,增油效果逐年变差。为此在该区开展了污水蓄能压裂工艺试验,采用污水蓄能压裂的试验井的累计增油量相较于常规压裂试验井多达280 t,增油效果明显[7]。

近些年,蓄能压裂技术在我国的低渗透油田中得到了广泛的应用和试验,试验结果显示,该技术可以显著增加单井的产液和产油量,为低渗透油田的高效开发开辟了新的路径。

4.2. 老油田增产改造

对于老井,随着生产时间的延长,原有的水力裂缝会逐渐失效,高导流通道会逐渐关闭,同时地层流体严重不足,单井生产效果逐年变差,面临关井风险。通过对老井进行蓄能压裂,可重新建立高导流通道并补充地层能量。

吉林油田致密油老水平井地层亏空严重,新井压裂时裂缝在低应力区单翼扩展,新井改造不充分,于是在吉林油田开展老井蓄能压裂技术研究,建立新老水平井蓄能压裂数值模型。分析了地层压力系数与蓄能液量的关系,形成了水平井老井不同储层参数的蓄能液量优化图。老井实施蓄能压裂作业正常,压力恢复周期缩短至5~10天,稳定压力达5.2 MPa,地层能量恢复良好[20]有效地指导了水平井的地层能量补充。

姬塬油田储层裂缝不发育,属低孔、特低渗油藏,注水开发长期低产低效生产。实施蓄能压裂后,缝网重构,剩余油动用程度得到提高,单井产能有效发挥,提高2.5倍[21]。

X油田储层孔隙度为14.4%,渗透率为 $6.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为低渗透油田。应用蓄能压裂工艺后,单井累计增油是常规压裂井的2.7倍,有效提高了低渗透油田老井增产效果[9]。

可见蓄能压裂技术能够有效造缝,对改善老井剩余油动用程度低、供液能力不足、地层压力下降有着显著的作用,能够有效提高老井采油速度和开发水平。

5. 蓄能压裂技术应用前景

蓄能压裂技术是我国低渗透油气藏开发中的核心技术之一,其实际应用效果已经得到了广泛验证。为了进一步增强技术的效果,可以从三个主要方面进行研究优化:

(1) 为了进一步提高低渗透油藏的采收率,需要深入研究蓄能压裂参数的优化,特别是注采参数的匹配和蓄能周期的优化等核心技术,建立基于储层特征的参数优化体系;

(2) 探索蓄能压裂、二氧化碳驱替和微生物采油等技术在提高采收率方面的联合应用模式,并通过技术的耦合来实现产量和效率的提升;

(3) 需要加大对新型蓄能压裂材料的研究和应用,特别是高效蓄能剂和环保型压裂液体系的研发,这不仅可以提高蓄能效果,还可以降低操作成本,并增强对环境的友好性。

参考文献

- [1] Hu, W., Wei, Y. and Bao, J. (2018) Development of the Theory and Technology for Low Permeability Reservoirs in China. *Petroleum Exploration and Development*, **45**, 685-697. [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(18\)30072-7](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(18)30072-7)
- [2] 李宏伟. 全球非常规油气勘探方兴未艾[R]. 中国石油新闻中心, 2024.
- [3] 傅程, 严格, 张威, 等. 低渗透油藏 CO₂ 水气交替驱参数优化对提高采收率的影响分析[J]. 矿山工程, 2024, 12(4): 725-728.
- [4] Yao, Y. and Ge, J. (2011) Characteristics of Non-Darcy Flow in Low-Permeability Reservoirs. *Petroleum Science*, **8**, 55-62. <https://doi.org/10.1007/s12182-011-0115-3>
- [5] 王怀林. 致密油储层蓄能增渗机理及参数优化研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆科技学院, 2023.
- [6] 潘文博. 注水开发油藏蓄能重复压裂数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
- [7] 赵成琢. 低渗透油田污水蓄能压裂工艺技术研究[J]. 化学工程与装备, 2017(8): 275-277.
- [8] 李佳, 陈明贵, 耿向飞, 等. 低界面张力活性纳米流体的研制与渗吸驱油机理分析[J]. 油田化学, 2021, 38(2): 284-290.
- [9] 王薇. 低渗透油田老井蓄能压裂工艺技术[J]. 石油知识, 2020(3): 58-59.
- [10] 陈宇. 基于剩余油分布的超低渗油藏重复压裂参数优化研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
- [11] 薛俊杰, 郭东红, 管保山, 等. 减阻剂在页岩气压裂中的研究及应用[J]. 精细与专用化学品, 2021, 29(5): 14-22.
- [12] 钟立国, 韩大匡, 李莉, 等. 特低渗透油藏二氧化碳吞吐模拟[J]. 大庆石油学院学报, 2009, 33(4): 120-124, 145-146.
- [13] 赵凤兰, 张蒙, 侯吉瑞, 等. 岩心驱替实验法测定低渗透油藏 CO₂ 近混相最小混相压力[J]. 油田化学, 2018, 35(4): 665-670.
- [14] 丁勇, 马新星, 叶亮, 等. CO₂ 破岩机理及压裂工艺技术研究[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(6): 151-159.
- [15] 段永伟, 张劲. 二氧化碳无水压裂增产机理研究[J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(4): 101-105.
- [16] 王强, 赵金洲, 胡永全, 等. 页岩油储集层压后焖井时间优化方法[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(3): 586-596.
- [17] 王金龙, 腊丹萍, 雷兆丰, 等. A 区页岩油蓄能压裂后合理焖井时间研究[J]. 石油化工应用, 2020, 39(6): 88-90.
- [18] 张相春, 杨亚静, 刘军龙, 等. 页岩油藏开发合理焖井时间数值模拟[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2021, 36(3): 71-76.
- [19] 张斌. 注水 + 重复压裂技术攻克世界级难题[N]. 中国石油学会, 2016-05-05(002).
- [20] Xu, J., Xuan, G., Liu, H., Zou, Y., Chen, K. and Wang, C. (2022) Research on Energy Storage Fracturing Technology for Old Horizontal Wells in Tight Oil. In: Lin, J., Eds., *Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2021*, Springer Nature, 705-715. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2149-0_63
- [21] 杨健, 范鹏, 许志雄, 等. 姬塬油田 A 区长 8 油藏蓄能压裂技术研究及应用[C]//宁夏回族自治区科学技术协会. 第十七届宁夏青年科学家论坛石油石化专题论坛论文集. 2021: 28-31.