

高能气体压裂在油气井开采过程中的应用研究

陈进, 魏佳乐, 刘雨辰, 罗晟昊, 方洁茹

湖北航天力源科技有限公司, 湖北 襄阳

收稿日期: 2026年4月11日; 录用日期: 2026年5月16日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

由于高能气体压裂可产生不受主应力控制的分支裂缝, 常被应用于老井改造中, 尤其对于油气层内改造、层内定向压裂具有无可替代的优势。本文比较了爆炸压裂、高能气体压裂、水力压裂三者储层改造中的作用效果。试验说明高能气体压裂可在较短时间内增加井眼内峰值压力, 压裂造缝作用可分为三个阶段, 其中第二阶段为压力缓慢上升阶段, 该阶段储层可产生多条裂缝。高能气体压裂在保证产生多条不易闭合裂缝的同时, 可将裂缝延伸至数米之外, 采用该方法增加了储层改造体积。

关键词

高能气体压裂, 储层改造, 射孔

Research on the Application of High-Energy Gas Fracturing in the Exploitation of Oil and Gas Wells

Jin Chen, Jiale Wei, Yuchen Liu, Shenghao Luo, Jieru Fang

Hubei Aerospace Liyuan Technology Co., Ltd., Xiangyang Hubei

Received: April 11, 2026; accepted: May 16, 2026; published: May 29, 2026

Abstract

Due to the fact that high-energy gas fracturing can generate branch fractures that are not controlled by the principal stress, it is often applied in the renovation of old wells, especially in the internal renovation of oil and gas layers and directional fracturing within the layer, where it has irreplaceable advantages. This paper compares the effects of explosive fracturing, high-energy gas fracturing, and hydraulic fracturing in reservoir renovation. The experiments show that high-energy gas fracturing can increase the peak pressure in the wellbore within a relatively short period of time. The fracturing and crack formation process can be divided into three stages, among which the second

stage is a period of slow pressure increase, during which multiple fractures can be generated in the reservoir. High-energy gas fracturing can ensure the generation of multiple fractures that are not easily closed, and extend the fractures to several meters away. By using this method, the volume of reservoir renovation is increased.

Keywords

High-Energy Gas Fracturing, Reservoir Modification, Perforation

Copyright © 2026 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

石油和天然气等传统能源作为人类赖以生存的重要物质保障,自第一次工业革命以来,得到了大规模的开发利用,但进入 21 世纪以来,常规石化能源日渐枯竭,亟须加快对煤层气、致密页岩气等非常规能源的进度[1][2]。但非常规油气资源常常储层于致密且硬度较高的储层中,这些储层往往表现出较难的改造空间。对于致密储层的改造,采用传统水力压裂技术需要较高的压力使岩层达到破裂压裂,同时也需要极大的供水量来满足压裂要求,不利于资源合理开发利用[3][4]。为改变传统水力压裂方法压力不足问题,衍生出爆炸压裂法[5]-[7],爆炸压裂法常常配合水力压力法进行施工,施工过程中采用水力压裂将岩层破裂出一条主裂缝,然后点燃裂缝中火药,瞬间产生的高能冲击波对周围岩层产生破坏效果,从而增加储层的空隙率,该技术的优点在于裂缝扩展方向不受应力约束,裂缝延展性较好[8]。但该技术存在一定的缺陷,爆炸产生的压力较大,常常应用于老井改造,探井重复试油过程[7]。相比于上述两种压裂开采方法,高能气体压裂通过化学反应产生大量高能气体,以冲击波和应力波的形式作用于周围岩石介质,在井壁周围形成破碎区及放射状裂纹[9][10]。提高储层裂缝发育水平,从而增加了储层渗透率,是非常规油气开采过程的常规手段[11][12]。通过研究发现在高能气体压裂过程中,高温气体首先在射孔枪内快速扩散至井筒,当井筒内火药燃气增加到超过静水压力时,高温燃气进入岩石储层裂缝,孔道内燃气快速增加,但气体压力达到地层的破裂压力后,射孔枪内、井筒内、孔道内三者压力趋于一致,增长至最大值[1]。通过建立数学物理模型显示,根据最大拉应力准则,受峰值压力与水平最小主应力夹角影响,高能气体压裂仍符合有利于沿水平最小主应力扩展准则[13]。当裂缝传播方向与岩层界面相垂直时,更有利于裂缝传播,在穿过界面之前,裂缝传播速度急剧减小,穿过界面后传播速度增加后减小[14]。

2. 高能气体压裂裂缝扩展机理

2.1. 平衡方程

在高能气体压裂过程中,由于燃爆作用,气体对井壁存在两种作用载荷,首先是持续较短的瞬时应力波,然后是持续时间较长的准静态压力,根据维纳方程[2]:

$$\frac{E}{2(1+\nu)}u_{1i,jj} + \frac{E}{2(1+\nu)(1-2\nu)}u_{1j,ji} = \rho_s \frac{\partial^2 u_{1i}}{\partial t^2} \quad (1)$$

其中 $1_i (i = x, y, z)$ 是动态位移(m), ρ_s 是岩石密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), t 是时间(s)。

$$\frac{E}{2(1+\nu)}u_{2i,jj} + \frac{E}{2(1+\nu)(1-2\nu)}u_{2j,ji} - ap_j + F_{bi} = 0 \quad (2)$$

其中 $2_i (i = x, y, z)$ 是静态位移(m), p 是气体压力, $\alpha (\leq 1)$ 是 Biot 的系数, F_{bi} 是 i 方向上净体力的分量 ($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$)。

2.2. 气体流动方程

在高能气体压裂过程中, 会瞬间释放出大量高压气体。这些气体随后会在多孔岩石和爆破引起的裂缝中传播, 这一过程极其复杂。基于连续介质力学, 气体传播被简化为在具有裂缝修正孔隙度和渗透率的多孔介质中的气体流动过程[15]。

如果气体流动遵循达西定律:

$$\mathbf{q} = -\frac{k}{\mu} \nabla p. \quad (3)$$

多孔岩石中气体流动过程的质量守恒方程可以表示为下式

$$\varphi \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{k}{\mu} p \nabla p \right) = \frac{p_a}{\rho_{ga}} Q_s, \quad (4)$$

其中 φ 是岩石的孔隙度, μ 是气体的动态粘度 ($\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$), k 是岩石的渗透率 (m^2), ρ_{ga} 是气体密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) 在标准条件下, p_a 是标准条件下的气体压力 (Pa), Q_s 是源项 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$)。

2.3. 裂缝扩展几何模型

根据弹性理论, 高能气体压裂裂缝尖端的应力强度因子和裂缝宽度可由下式表达。

$$w_f(x) = \frac{4(1-\nu)}{\pi G} \int_x^{L_f} \left[\int_0^\eta \frac{(P-\sigma_0)}{\sqrt{\eta^2-\xi^2}} f_{2w} \left(\frac{\xi}{\eta}, \frac{\eta}{r_w} \right) d\xi \right] f_{2w} \left(\frac{x}{\eta}, \frac{\eta}{r_w} \right) \frac{\eta d\eta}{\sqrt{\eta^2-x^2}} \quad (5)$$

$$K_I = 2\sqrt{\frac{L_f}{\pi}} \int_0^{L_f} \frac{(P-\sigma_0)}{\sqrt{L_f^2-x^2}} f_{2w} \left(\frac{x}{L_f}, \frac{L_f}{r_w} \right) dx \quad (6)$$

式中, G 为页岩岩石的剪切模量, 10 MPa; ν 为页岩泊松比; P 为在裂缝中的流体压力, MPa; σ 为围压, MPa。

对于双翼裂缝, 加权函数可以通过以下式子来表示

$$f_{2w} \left(\frac{x}{L_f}, \frac{L_f}{r_w} \right) = 1 + 0.3 \left(1 - \frac{x}{L_f} \right) \left(\frac{1}{1 + L_f/r_w} \right) \quad (7)$$

高能气体压裂往往产生多条裂缝, 考虑多条裂缝对裂缝宽度及应力强度因子的影响, 引入附加加权函数 f_N 。

$$f_N = f_{N_x} \frac{1 + \frac{N_f L_f}{\pi r_w}}{f_{N_x} + \frac{N_f L_f}{\pi r_w}} \quad (8)$$

式中, N 为裂缝条数, 加可以通过下式来计算:

$$f_{N_x} = 1 + \frac{\pi}{2} \left(\frac{2\sqrt{N_f-1}}{N_f} - 1 \right) \left(1 - \frac{x^2}{L_f^2} \right) \quad (9)$$

多裂缝总的加权函数为两个加权函数的总和:

$$f_{Nw} = f_N f_{2w} \quad (10)$$

用 f_{Nw} 替代等式(7)和(8)中的, 即可得到多裂缝的裂缝宽度和裂缝尖端应力强度因子的表达式。在模拟裂缝内流体流动时, 使用平均裂缝宽度, 可以通过下式来计算[16]:

$$\bar{w}_f = \frac{1}{L_f} \int_0^{L_f} W_f(x) dx \quad (11)$$

3. 高能气体压裂特征

储层改造中常规压裂方式主要分为爆炸压裂、高能气体压裂、水力压裂三种方式, 如图 1 所示[17]。以达到地层破裂压力为标准, 从作用时间上看, 水力压裂作用时间最长, 高能气体压力作用时间次之, 爆炸压裂发生时间最短。爆炸压裂由于作用时间最短, 发生较为迅速, 峰值压力最大, 而水力压裂作用时间最长, 在井下压力上升较为缓慢, 且峰值压力最小。

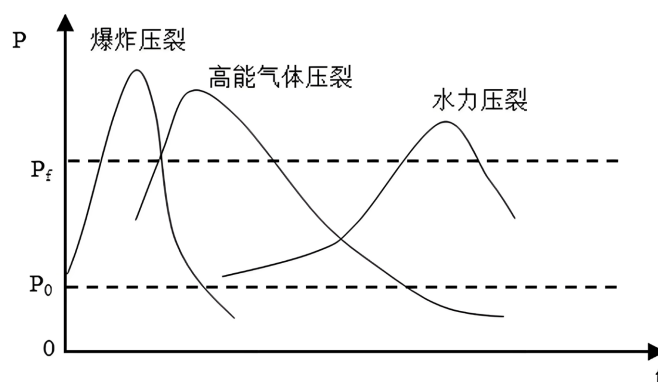


Figure 1. P-T curve diagrams of three fracturing methods

图 1. 三种压裂方式 P-T 曲线图

含能固体推进剂在燃烧过程中可产生几兆帕到数百兆帕的高压能量, 高能压力对射孔通道做功, 当压力达到地层破裂压力 P_f 时地层开裂, 在井眼周围产生多条裂缝。区别于水力压裂产生的单一双翼型裂缝及爆炸压裂产生的压实型裂缝, 高能气体压裂可在井眼周围形成数条径向放射状裂缝并延伸成小型缝网, 在增加裂缝倒流能力的同时, 还可沟通天然裂缝, 增加储层倒流能力。在作用过程中, 水力压裂往往形成于水平最大主应力平行的单翼裂缝, 裂缝形态较为单一, 对储层改造效果较差, 但在水力作用下, 储层裂缝往往延伸较长, 具有不易闭合等性质, 如图 2 所示[18]。

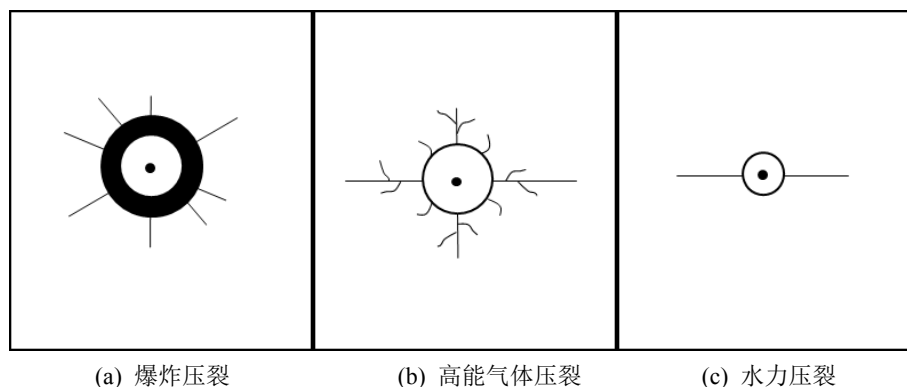


Figure 2. Schematic diagrams of fracture propagation for three fracturing methods

图 2. 三种压裂方式性裂缝扩展示意图

三种压裂方式优势对比如表 1 所示。水力压裂产生垂直于最小主应力的双翼型裂缝，裂缝不易于闭合。高能气体压裂裂缝扩展方向较为随机，往往沿井壁形成数条分支裂缝，可有效对储层进行改造，爆炸压裂由于其自生冲击波较强，在井下产生爆燃，作用时间极短，导致井下裂缝扩展不充分，裂缝只在井眼附近扩展，裂缝长度较短，其易于闭合[15]。

Table 1. Performance comparison of three fracturing methods

表 1. 三种压裂方式性能对照表

| 特征 | 水力压裂 | 高能气体压裂 | 爆炸压裂 |
|--------|---------------|----------|--------|
| 能量来源 | 水压 | 推进剂爆燃 | 爆炸能 |
| 作用时间 | 慢(分钟) | 较快(毫秒) | 快速(微秒) |
| 高压持续时间 | 长 | 较短 | 短 |
| 裂缝特征 | 与最大主应力平行的单翼裂缝 | 随机方向数条裂缝 | 大量破碎裂缝 |
| 裂缝长度 | 长 | 较长 | 短 |
| 裂缝闭合时间 | 慢 | 较慢 | 慢 |

高能气体压裂技术的动力源来自固体推进剂，在油气井压裂过程中，通过特定技术手段将推进剂送至目的层段，通过地面通电或投棒方式将其点燃。相比于爆炸压裂作用时间的微秒级及水力压裂的秒级，高能气体压裂作用时间介于两者之间，达到毫秒级，如图 3 所示。AB 段主要作用于裂缝起裂，火药在第一时间被点燃，燃爆产生的应力波迅速传播至井壁，并使井壁压力骤升至峰值压力，当井壁岩石所受压力大于岩石破裂强度时，井壁岩石开始起裂。BD 段主要作用是裂缝扩展延伸，高压燃气作用在裂缝内使其不断扩展延伸，其过程中压力不断降低，这一过程是裂缝扩展的主要阶段。当到达 DE 段时裂缝已基本不再延伸或扩展延伸程度很小，此阶段内由于燃气压力明显降低，已不能提供足够的压力使裂缝扩展，对裂缝影响甚微，随着时间的增大，裂缝扩展停止[18]。

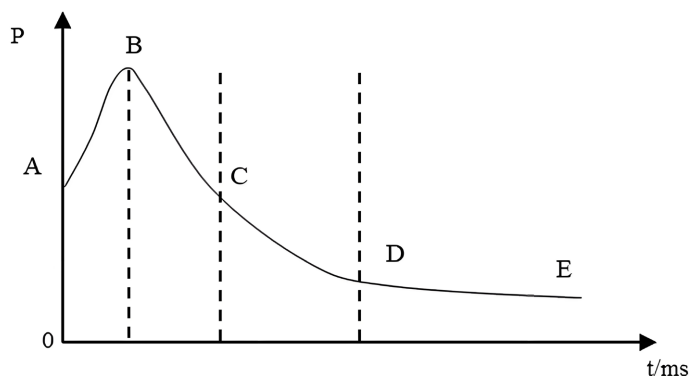


Figure 3. Schematic diagram of fracture propagation in three fracturing methods

图 3. 三种压裂方式裂缝扩展示意图

4. 高能气体压裂试验测试

为观察高能气体压裂的造缝机理，按照一定比例设计尺寸为 $100\text{ cm} \times 100\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ 的立方体，在立方体中心预留一个爆破孔，其中孔径 5 cm ，孔深 45 cm 。首先将一定尺寸的推进剂置于孔内，然后对孔眼进行封孔以模拟推进剂在井下燃烧，为对孔内压力变化进行监测，分别在孔底及距离孔底 11 cm 处

安装 PVD 压力传感器。如图 4 所示。

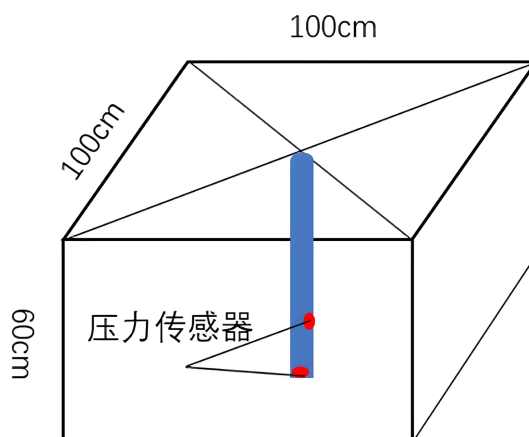


Figure 4. Schematic diagram of test device

图 4. 试验装置示意图

如图 5 所示, 高能气体在钻孔燃烧过程中孔底和孔中的压力变化曲线趋于一致, 总体分为快速升压阶段、缓慢升压阶段、非线性降压阶段。初始阶段, 由于推进剂被引燃, 产生的高温高压气体作用于孔壁, 使得孔壁压力迅速上升, 孔中和孔底压力分别达到 100 MPa 及 70 MPa, 在冲击应力作用下, 试样出现裂纹, 对应图 1 中的 AB 前半段。随着推进剂逐渐燃烧, 高温气体进入裂纹缝隙并驱动裂缝向外扩展, 高温气体不断进入试样, 该阶段推进剂还在不断发生燃烧, 孔壁中的压力表现为不断上升过程, 但上升速度明显降低, 孔中和孔底压力分别上升至 120 MPa 及 80 MPa。随着裂缝不断向孔外发育, 直至试样发生破裂, 气体快速溢出, 孔内压力迅速下降, 对应图 1 中的 AB 后半段。当裂缝发生扩展, 推进剂燃烧结束后, 裂缝内的气体压力快速降低, 显示为非线性阶段, 对应图 1 中的 BE 段。

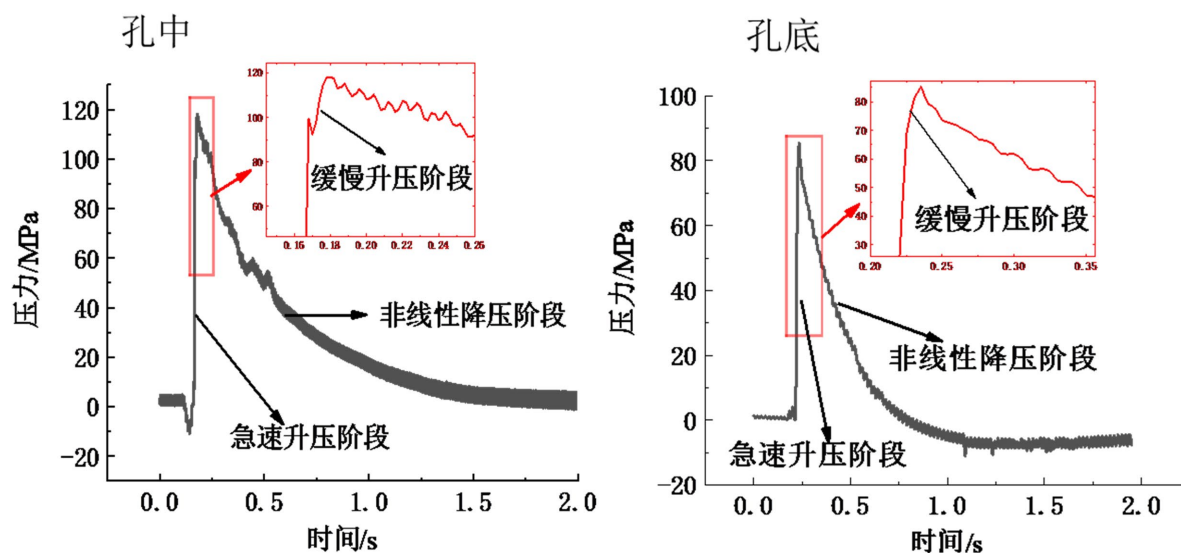


Figure 5. Pressure-time curve of hole wall [19]

图 5. 孔壁压力 - 时间曲线[19]

压裂完成后, 试样裂缝扩展形态如图 6 所示, 高能气体压裂出现 3 条主裂缝, 呈贯穿态扩散, 形成不规则锯齿形裂缝, 该裂缝的形成可有限避免裂缝的闭合, 可有效增加储层的倒流能力, 为油气开采提

供裂缝通道。



Figure 6. Reservoir fracture morphology after fracturing [20]

图 6. 压裂完成后储层裂缝形态[20]

5. 总结

高温气体作用于岩石储层, 相较于爆炸压裂, 其裂缝延伸更远, 相较于水力压裂, 可产生多条裂缝, 对于储层改造更加彻底。高温气体在井下燃烧主要分为三个阶段, 压力快速上升阶段、压力缓慢上升阶段、压力非线性降低阶段, 其中压力缓慢上升阶段为造缝阶段, 三个阶段作用时间均处于毫秒级。高温气体压裂造缝作用主要发生在第二阶段, 该阶段可使岩石产生多条分支裂缝, 增加储层改造体积。

本研究基于自由边界条件下研究推进剂对岩石裂缝扩散的影响, 未考虑围压条件下对储层裂缝扩展形态的影响, 研究具有一定的局限性, 后续可开展在不同围压及静水压力条件下的相关研究。

参考文献

- [1] 明晓添, 刘东尧. 井下高能气体压裂设计数值模拟研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(5): 158-162.
- [2] Bai, Y., Sun, L. and Wei, C. (2020) A Coupled Gas Flow-Mechanical Damage Model and Its Numerical Simulations on High Energy Gas Fracturing. *Geofluids*, 2020, Article ID: 3070371. <https://doi.org/10.1155/2020/3070371>
- [3] 张小军, 廖文德, 邹云辉, 等. 低透气性松软煤层增透技术研究现状及高能气体压裂新技术[J]. 能源与环保, 2018, 40(11): 94-98.
- [4] Wu, F., Wei, X., Chen, Z., Rahman, S.S., Pu, C., Li, X., *et al.* (2018) Numerical Simulation and Parametric Analysis for Designing High Energy Gas Fracturing. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 53, 218-236. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.02.011>
- [5] 徐鹏, 程远方, 张晓春, 等. 水泥试样爆炸压裂实验及裂纹分形评价[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(2): 179-184.
- [6] 赵志红, 郭建春. 层内爆炸压裂技术原理及分析[J]. 石油天然气学报, 2008(2): 297-299.
- [7] 徐鹏, 程远方, 刘丹, 等. 爆炸压裂下围压对井壁破碎效果的影响[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(6): 22-25.
- [8] 陈华彬, 马自强, 艾生军, 等. 射孔高能气体压裂技术研究及应用[J]. 钻采工艺, 2020, 43(3): 67-69.
- [9] Huang, B., Liu, C., Fu, J. and Guan, H. (2011) Hydraulic Fracturing after Water Pressure Control Blasting for Increased Fracturing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48, 976-983. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.06.004>
- [10] 吴晋军, 王安仕. 射孔-高能气体压裂复合技术装置的研制[J]. 钻采工艺, 1997(6): 65-69.
- [11] Mandira, A. and Krishna, K.V. (2022) Comparing the Performance of Supercritical CO₂ Fracking with High Energy Gas Fracking in Unconventional Shale. *MRS Energy & Sustainability: Fernand Braudel Center for the Study of Economies, Historical Systems, and Civilizations*.
- [12] Wei, X., Wang, X., Wu, G., Liu, Q. and Zhang, Y. (2023) Research and Application of High-Energy Gas Fracturing

-
- Mechanism Based on CT Scanning Technology. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **56**, 7981-7996. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03487-w>
- [13] 武进壮, 吴晋军. 煤储层液体药高能气体压裂先导性研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(S2): 179-183.
- [14] Li, H., Kang, T., Zhang, R., Zhang, X., Liang, X., Zhu, W., *et al.* (2024) Numerical Study of the Effects of Loading Parameters on High-Energy Gas Fracture Propagation in Layered Rocks with Peridynamics. *Engineering Fracture Mechanics*, **310**, Article ID: 110516. <https://doi.org/10.1016/j.engframech.2024.110516>
- [15] 杨卫宇, 张廷汉, 张永良. 高能气体压裂径向多裂缝延伸数值模拟方法[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 1993(3): 1-5.
- [16] 孙志宇, 刘长印, 苏建政, 等. 多级脉冲高能气体压裂裂缝动态扩展分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(6): 121-124.
- [17] 郝兰香, 张强, 包小红, 等. 爆燃压裂及其适用的地质条件研究[J]. 西北地质, 2001, 34(2): 88-94.
- [18] 江莹, 邓守春, 李海波. 甲烷燃爆压裂技术的实验研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(12): 4297-4307.
- [19] Li, J., Li, G., Wang, Z., Yu, M. and Gao, J. (2022) Experimental Study on High-Energy Gas Fracturing Artificial Coal. *Applied Sciences*, **12**, Article No. 11606. <https://doi.org/10.3390/app122211606>
- [20] 李军军, 余梦飞, 李国富, 等. 模拟煤样航天固体推进剂致裂试验研究[J/OL]. 煤炭科学技术, 1-9. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1022>, 2026-05-21.