

DOI : 10.11779/CJGE201601021

水力加砂压裂试验装置的研制及应用

徐 峰¹, 杨春和^{1,2}, 郭印同¹, 王 磊¹, 魏元龙², 侯振坤², 卞晓冰³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 3. 中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘 要: 为研究非常规天然气开采过程中支撑剂的运移规律, 自主研发水力加砂压裂试验装置。该装置主要由岩石三轴试验机、压裂液泵压伺服控制系统、声发射监测系统 3 个部分组成, 且具有以下特点: 可以模拟不同地应力、不同排量条件下携砂压裂试验; 压裂液注入可以通过流量模式和压力模式控制; 改进的声发射探头具有耐高压性能, 能够用于三轴室内。采用该装置进行了不同地应力、不同排量以及携砂条件下水力压裂试验, 结果显示: 地压力越大、排量越大红色砂岩起裂压力越大; 携砂压裂后的压裂面离裸眼越远, 支撑剂浓度越低且支撑剂并不是遍布所有压裂面; 声发射累计计数在初期比较稳定, 呈线性增加, 在起裂前迅速增多。

关键词: 水力加砂压裂; 试验装置; 起裂压力; 支撑剂; 声发射

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)01-187-06

作者简介: 徐 峰(1991-), 男, 四川宜宾人, 博士研究生, 主要从事水力压裂试验与理论研究。E-mail: ucasxf@163.com。

Development and application of experimental apparatus of hydraulic sand fracturing

XU Feng¹, YANG Chun-he^{1,2}, GUO Yin-tong¹, WANG Lei¹, WEI Yuan-long², HOU Zheng-kun³, BIAN Xiao-bing³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to study the transport rules of propping agent in unconventional gas exploration, an apparatus of hydraulic sand fracturing is developed. It is mainly composed of rock triaxial testing machines, servo control system of hydraulic fracturing pump and acoustic emission text system. The advantages of the apparatus are illustrated as follows: (1) Hydraulic sand fracturing tests are able to be implemented under different formation stresses and pump rates. (2) Fracturing fluid injection is controlled by means of the pump rate or pump pressure. (3) AE sensor is improved for pressure-resistance, which can be used in triaxial cell. A series of hydraulic fracturing tests are performed under a combination of different formation stresses, different pump rates and fracturing fluid with sand conditions by this apparatus. The results show that the larger the formation pressure and the higher the pump rate, the larger the initiation pressure in red sandstone. The further distance the hydraulic sand fracturing surface off the open hole, the lower the concentrations of agent. But the local part has no propping agent. AE cumulative hits linearly relate with the time at the initial stage and increase rapidly while the sandstone approaches failure.

Key words: hydraulic sand fracturing; experimental apparatus; initiation pressure; propping agent; acoustic emission

0 引 言

非常规天然气(包括页岩气、致密砂岩气、煤层气)资源储量高,勘探开发潜力大。在当今社会对能源需求不断增加的情况下,天然气成为了一种相对清洁高效的燃料,在未来,非常规天然气尤其是页岩气将占据重要地位。但是由于非常规天然气储存基质渗透性差,常规开采难度大。水力压裂已经成为页岩气、致密砂岩气开采的核心技术,煤层气开采的重要技术。通过水力压裂沟通天然裂缝,压开岩石和支撑剂支撑

裂缝,产生高渗透路径,达到增产的目的^[1]。

国内外对水力压裂做了大量研究, Song 等^[2]研制了水力压裂试验装置,测试内腔液体注入速度对厚壁圆筒的强度影响。Alsayed 等^[3]研究了不同轴压、围压、内腔水压应力状态下砂岩的破坏情况。Ishida 等^[4-5]

基金项目: 国家自然科学基金项目(51574218); 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB10040200); 中国石化科技攻关项目: 涪陵区块页岩气层改造技术研究(P14091); 国家高技术研究发展计划("863")项目(2013AA064800)
收稿日期: 2014-12-26

研究了采用水、油、超临界 CO₂ 等不同粘度液体作为压裂液时,对试件破坏形式和声发射信号的区别进行研究。Chitrana^[6]利用声发射系统监测了致密砂岩裂缝的延展规律,采用 SEM 对压裂后的岩石表面形态进行分析。郭印同等^[7]、衡帅等^[8]、陈勉等^[9]采用大尺寸真三轴模拟试验系统,在不同地应力、不同排量条件下对页岩进行了水力压裂试验,利用声发射和 CT 技术对裂缝扩展规律和最终形态进行研究。翟成等^[10]研究了采用不同压力、频率下脉动水力压裂型煤试验,分析了脉动水作用下煤体的疲劳损伤破坏特点及高压脉动水楔致裂机理。温庆志等^[11]通过室内实验,研究了施工排量(缝内流速)、缝宽、支撑剂粒径、压裂液黏度和砂比等参数对支撑剂沉降及水平运移速度的影响。郭建春^[12]利用软件模拟了支撑剂在裂缝面的沉积规律,发现越接近缝口支撑剂浓度越大。

虽然对室内大尺寸试件和厚壁圆筒的水力压裂开展了部分试验研究和现场水力加砂压裂获得了数据,并取得了一些研究成果。但是国内外至今没有针对水力加砂压裂物理模拟试验进行研究,对此现场水力加砂压裂缺乏理论依据。

根据水力加砂压裂的原理,研制了水力加砂压裂装置。本文主要介绍该装置的技术原理、主要性能参数以及应用此装置开展的部分砂岩水力加砂压裂试验,并对获得的试验结果进行初步分析。

1 装置的主要功能与技术参数

水力加砂压裂装置可进行不同地应力、不同排量、不同加砂比等条件下的压裂。同时采用声发射监测系统监测压裂过程中的声发射现象,本试验装置能够揭示压裂液携砂的运移规律和机制,为非常规天然气水力加砂压裂技术奠定理论基础。

水力加砂压裂装置,如图 1 所示。主要由岩石三

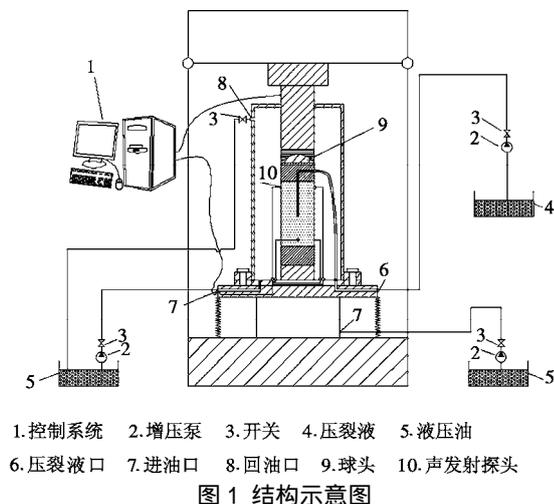


Fig. 1 Structural diagram of experimental apparatus of hydraulic sand fracturing

轴试验机、压裂液泵压伺服控制系统、Disp 声发射检测系统等。

1.1 岩石三轴试验机 (XTR01-01)

岩石三轴试验机由轴压系统、围压系统、微机控制系统等组成。主要技术参数:最大轴压为 2000 kN,试验力示值最大相对误差 < 1.0%。最大围压为 80.0 MPa,试验力示值最大相对误差 < 1.0%。最大轴向位移为 100.0 mm,位移示值最大相对误差 < 1.0%。

最大轴向应变测量范围为 10.0 mm,示值最大相对误差 < 1.0%。最大径向应变测量范围为 20.0 mm,示值最大相对误差 < 1.0%。

1.2 压裂液泵压伺服控制系统

压裂液泵压伺服控制系统最高泵压 70 MPa,并配有 80 MPa 的压力传感器,150 mm 的位移传感器,如图 2 所示。该系统可以通过流量模式和压力模式两种方式控制注入压裂液,其中流量模式排量范围为 0.01 ~ 10 mL/s。增压器容积为 300 mL,且可以实现压裂液中含有一定浓度的支撑剂。泵操作方便,自动化程度高,流量、位移、压力数据可以实时反馈于计算机。



图 2 压裂泵伺服控制系统

Fig. 2 Servo control system of hydraulic fracturing pump

1.3 Disp 声发射检测系统

Disp 声发射测试系统由美国物理声学公司研制,在岩石力学中已经比较成熟并得到了广泛的应用。声发射探头经中国科学院武汉岩土所自主改造,具有耐高压高温特性,可用于三轴室内,如图 3 所示。相对于放在三轴室外能够接收到更加精确的信号,经前期多次试验得到高油压下声发射探头工作性能稳定可靠。试验过程中采用 4 个声发射探头接收信号,以便有效监测内部裂缝起裂信息。



图 3 声发射系统及探头

Fig. 3 Acoustic emission test system and sensor

2 水力加砂压裂试验

2.1 压裂试样制备

将砂岩试件切割、打磨加工成 $100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的圆柱体, 两端保证光滑平整, 平行度满足岩石力学试验要求 ($\pm 0.02\text{ mm}$ 以内), 以免造成不均匀受力; 然后在圆柱体中心采用 12 mm 金刚石钻头钻 115 mm 预制井眼。模拟套管采用 $6 \times 1.5\text{ mm}$ 高强度不锈钢管, 钢管外表面加工螺纹, 用环氧树脂胶注入套管与预制井眼之间的空隙处, 套管上端采用 o 型圈与上压头密封, 试件实物图和简图如图 4 所示。



图 4 红砂岩试件

Fig. 4 Red sandstone samples

2.2 水力压裂试验步骤

(1) 将上一步制作好的砂岩圆柱体 (含套管) 中心管中加入红染色剂, 将试件放置于压力室下部压头上, 上部压头压在试件上端部, 套上长度适合的热缩管。用热风枪使圆筒热缩管均匀受热收缩, 并保证圆筒热缩管与砂岩侧面接触紧密, 然后用金属箍分别箍住上下压头的密封 o 型圈, 将三轴室内液压油和试件表面分开; 空间采用“十”字型在圆柱高 25 mm 和 175 mm 处安放声发射探头 4 个, 并用弹簧圈固定; 将径向位移引伸计、轴向位移引伸计安装于砂岩试件的中部位置, 连接好数据传输接线, 最后将三轴室与底盘用螺栓固定。

(2) 为了防止压裂过程中空气压缩产生的压力对

水力压裂造成影响, 先在压裂液流经管中和试件套管中充满试验采用的压裂液后, 再进行连接进行试验。

(3) 利用岩石三轴试验机加载系统 (XTR01-01) 完成围压和轴压的加载, 启动压裂液泵压和声发射检测系统, 控制系统实时采集水力压裂过程中的数据。

(4) 压裂完成后, 停止泵压, 让泵压自动减为 0。卸载围压和轴压, 关闭声发射监测系统, 拆取岩石试件, 并对岩石试件进行后期分析。

3 压裂方案可行性研究

为了验证试验机的性能, 进行了 3 组不同条件下的水力压裂: 不同地应力条件下的水力压裂; 不同排量控制条件下的水力压裂; 携砂压裂液条件下的压裂。

3.1 不同地应力条件下的水力压裂

本组试验主要考虑地应力对水力压裂的影响。采用不同的竖向地应力和水平地应力, 但保持偏应力恒定, 为 2.5 MPa 。首先施加水平地应力和竖向地应力到预定值, 并保持恒定不变, 按流量控制模式注入压裂液。

试验选用 4 块红色砂岩, 具体的试验条件和其起裂压力如表 1。4 块试件泵压曲线相似, 如图 5 (a) 所示。大致可以分为 3 个阶段: 第一阶段, 压力随时间以较小的斜率增加, 并且斜率不断增大如图 5 (b) 所示, 此阶段大致经历了 $100 \sim 150\text{ s}$ 。因为压裂液管路中不可避免存在一些气泡、裸眼段岩石的吸水性以及清水初期具有一定的可压缩性, 随着时间的推移, 这些因素减弱或者消失, 所以斜率不断增大。第二阶段, 当水压达到 2 MPa 左右后, 水压随时间以较大的斜率且呈直线上升, 4 块试件此阶段的斜率大致相等, 在 $200 \sim 300\text{ s}$ 平均增长速率为 0.172 MPa/s , 如图 5 (c) 所示。第三阶段, 到达某一临界水压时, 岩石沿内部破裂, 裂纹迅速贯穿至岩石表面, 压力骤降, 试验完成。图 6 给出起裂压力与水平地应力的关系, 由图可知, 随着水平地应力的增大, 起裂压力呈正相关的增大, 厚壁圆筒理论能够较好的解释这一现象。

表 1 A 组试件试验条件和起裂压力

Table 1 Experimental conditions and initiation pressures for sample group A

试件 编号	压裂 液	σ_v /MPa	$(\sigma_H = \sigma_h)$ /MPa	$(\sigma_v - \sigma_H)$ /MPa	排量 /($\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$)	起裂压 力/MPa
A-1	清水	17.5	15	2.5	0.05	30.38
A-2	清水	22.5	20	2.5	0.05	42.58
A-3	清水	24.5	22	2.5	0.05	45.35
A-4	清水	27.5	25	2.5	0.05	46.72

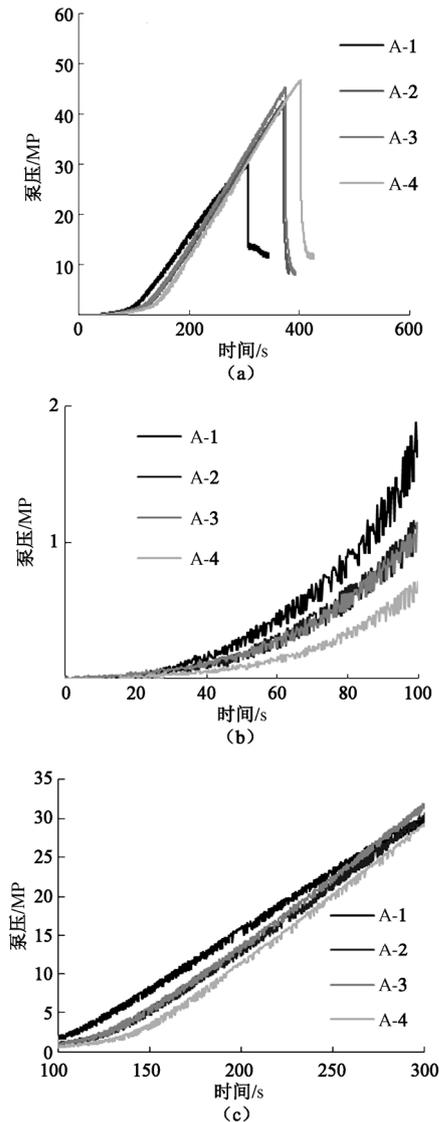


图5 水力压裂泵压-时间曲线

Fig. 5 Curves of pump pressure-time of hydraulic fracturing

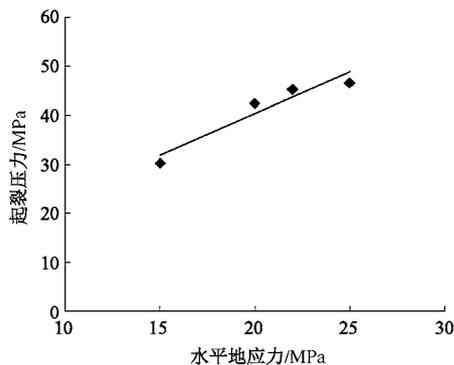


图6 红砂岩起裂压力-水平地应力曲线

Fig. 6 Initiation pressure-horizontal crustal stress curve of red sandstone

图7为试件A-3压裂后的图,由于竖向地应力大于水平地应力,岩石沿最小主应力方向压裂。在裸眼段双翼出现两个主要裂缝,裂缝面的夹角为 137° 。另一个次生单裂缝与一个主要裂缝的夹角为 16° 。

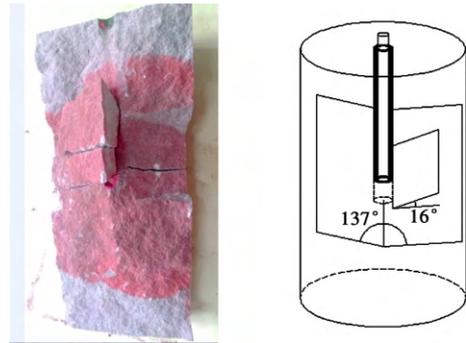


图7 试件A-3压裂后的裂缝分布

Fig. 7 Distribution of fractures after hydraulic fracturing for sample A-3

3.2 不同排量控制条件下的水力压裂

本组试验主要考察不同排量条件下对岩石水力压裂特性的影响。具体的试验条件及其起裂压力见表2,采用相同的地应力条件,不同的排量,试验结果如图8所示。试件B-1排量采用 0.01 mL/s ,由于此排量较小,试件裸眼段的渗流对试验影响较大。随着压力逐渐增大,渗流量加剧,在 2000 s 以后压力曲线斜率明显降低并逐渐向稳定渗流发展,与水力压裂现场差异太大,所以提前结束了此次试验。试件B-2、B-3起裂压力受排量的影响较大,相差达到了 15.67 MPa ,笔者认为有两种可能性:试件B-2排量较小,压裂时间相对于试件B-3长,造成裸眼段红砂岩的软化更严重。试件B-2水压增长较慢,裸眼段周边岩石孔隙压力可以跟随套管内水压一并增长,延迟性较弱;而试件B-3裸眼段周边岩石孔隙压力相对于套管内水压延迟性更明显,孔隙压力可以降低砂岩的有效应力,降低了地应力对岩石的束缚作用,使得能够以较小的注水压力使试件产生破坏。与试件B-2(与A-4是同一块)相比,试件B-3同样拥有3个阶段。不同的是由于注水排量为 0.10 mL/s 大于试件B-2的 0.05 mL/s ,所以试件B-3的第一阶段较短。试件B-3在第二阶段的增长速率为 0.39 MPa/s ,是试件B-2增长速率的2.24倍,大于2倍的增长速率是因为试件B-3加压较快,渗流较少。也更好的印证前面得出的结论试件B-2水压增长较慢,裸眼段周边岩石孔隙压力可以跟随套管内水压一并增长,延迟性较弱。

表2 B组试件试验条件和起裂压力

Table 2 Experimental conditions and initiation pressures for sample group B

试件编号	压裂液	σ_v /MPa	$(\sigma_H = \sigma_h)$ /MPa	$(\sigma_v - \sigma_H)$ /MPa	排量 / $(\text{mL}\cdot\text{s}^{-1})$	起裂压力
B-1	清水	27.5	25	2.5	0.01	失败
B-2	清水	27.5	25	2.5	0.05	46.72
B-3	清水	27.5	25	2.5	0.10	62.39

注:试件B-2与A-4属于同一块试件。

3.3 携砂压裂液条件下的压裂

本次试验的试件为青色砂岩, 压裂液成分比例为: 0.25% 低分子稠化剂+0.2% 流变助剂+0.15% 复合增效剂+0.05% 破胶剂+0.02% 消泡剂, 支撑剂尺寸根据几何相似理论选取。

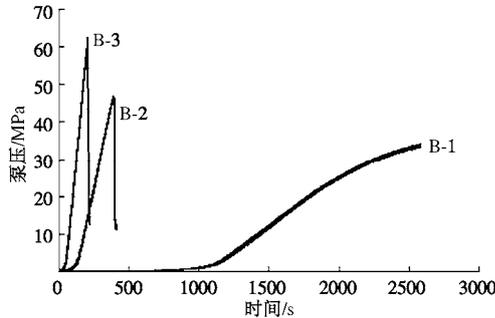


图 8 水力压裂泵压-时间曲线

Fig. 8 Curves of pump pressure-time of hydraulic fracturing

$$C = \frac{L_{\text{现}}}{L_{\text{实}}} = \frac{d_{\text{现}}}{d_{\text{实}}}, \quad (1)$$

式中, C 是相似理论比例常数, $L_{\text{现}}$ 是现场压裂缝宽的值, $L_{\text{实}}$ 是实验室压裂缝宽的值, $d_{\text{现}}$ 是现场支撑剂的直径值, $d_{\text{实}}$ 是实验室支撑剂的直径值。

根据计算, 选取 $d_{\text{实}}$ 为 600 目的金刚砂作为此次压裂试验的支撑剂。试件采用单轴条件下试验, 竖向地应力为 2.5 MPa, 试件起裂压力为 2.85 MPa。试件沿双翼裂开, 但是支撑剂并没有均匀的沉积在裂开的表面, 甚至部分裂开面并没有发现支撑剂的存在, 如图 9 所示。笔者认为这是因为靠近裸眼段, 裂缝较大, 支撑剂能够进入; 远离裸眼段时, 部分或全部区域的裂缝缝隙太小或裂开面起伏太大, 阻碍了支撑剂的进入。总体上讲, 越靠近裸眼段裂缝面的支撑剂浓度越大, 与郭建春^[12]采用数值模拟获得的结论一致。



图 9 裂缝面支撑剂的浓度分布

Fig. 9 Distribution of propping agent concentrations of fractures

4 声发射检测

图 10 是试件 B-3 的泵压、声发射累计撞击曲线。由图可知, 试件是瞬间拉裂破坏。在 195 s 之前, 累计撞击缓慢呈线性增加, 说明试件在破坏之前, 试件的损伤较小。在 195 s 时, 累计撞击数迅速增多, 说明此时试件已经开始发生局部的破坏, 当局部破坏达到一定程度后瞬间的脆性张拉型破坏发生。在 205 s 以后, 累计撞击数保持恒定。

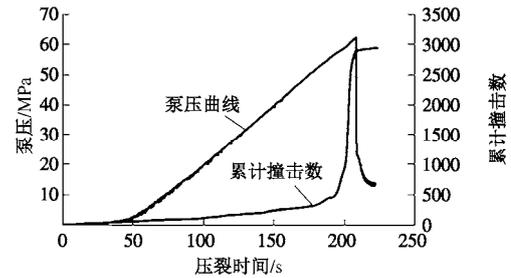


图 10 泵压与累计撞击数曲线

Fig. 10 Curves of pump pressure and AE cumulative hits

5 结 论

(1) 在现有水力压裂的设备基础上, 研制了水力加砂压裂试验装置, 可以为现场水力加砂压裂提供室内试验条件, 为研究支撑剂沉积规律提供基础。

(2) 通过不同地应力条件下的水力压裂, 试验结果表明起裂压力随地应力增大而增大。第一阶段泵压随时间以较小的斜率增加, 并且斜率不断增大。第二阶段泵压水压随时间以较大的斜率且呈直线上升直至破坏。

(3) 通过不同排量条件下的水力压裂, 试验结果表明排量大小对起裂压力影响较大。排量太小会因为渗流作用使试验失去意义, 排量在一定范围内, 起裂压力随排量增大而增大。

(4) 通过声发射检测得出: 水力压裂试件产生瞬时破坏, 累计撞击数在破坏前突然增多。支撑剂在压裂面的分布不均匀, 部分压裂面甚至没有, 总体上是裸眼段附近的支撑剂浓度相对于裸眼段远端支撑剂浓度更大。

参考文献:

- [1] 童晓光, 郭建宇, 王兆明. 非常规油气地质理论与技术进展[J]. 地学前缘, 2014, 21(1): 9-20. (TONG Xiao-guang, GUO Jian-yu, WANG Zhao-ming. The progress of geological theory and technology for unconventional oil and gas[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(1): 9-20. (in Chinese))
- [2] SONG I, SUH M, WON K S, et al. A laboratory study of

- hydraulic fracturing breakdown pressure in tablerock sandstone[J]. *Geosciences Journal*, 2001, **5**(3): 263 – 271.
- [3] ALSAYED M I. Utilising the Hoek triaxial cell for multiaxial testing of hollow rock cylinders[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, **39**(3): 355 – 366.
- [4] ISHIDA T. Acoustic emission monitoring of hydraulic fracturing in laboratory and field[J]. *Construction and Building Materials*, 2001, **15**(5): 283 – 295.
- [5] ISHIDA T, AOYAGI K, NIWA T, et al. Acoustic emission monitoring of hydraulic fracturing laboratory experiment with supercritical and liquid CO₂[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**(16).
- [6] CHITRALA Y, MORENO C, SONDERGELD C, et al. An experimental investigation into hydraulic fracture propagation under different applied stresses in tight sands using acoustic emissions[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, **108**: 151 – 161.
- [7] 郭印同, 杨春和, 贾长贵, 等. 页岩水力压裂物理模拟与裂缝表征方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, **33**(1): 52 – 59. (GUO Yin-tong, YANG Chun-he, JIA Chang-gui, et al. Research on hydraulic fracturing physical simulation of shale and fracture characterization methods[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, **33**(1): 52 – 59. (in Chinese))
- [8] 衡帅, 杨春和, 曾义金, 等. 页岩水力压裂裂缝形态的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(7): 1243 – 1251. (HENG Shuai, YANG Chun-he, ZENG Yi-jin, et al. Experimental study on hydraulic fracture geometry of shale[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(7): 1243 – 1251. (in Chinese))
- [9] 陈勉, 庞飞, 金衍. 大尺寸真三轴水力压裂模拟与分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000(增刊 1): 868 – 872. (CHEN Mian, PANG Fei, JIN Yan. Simulation and analysis of real triaxial hydraulic fracturing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000(S1): 868 – 872. (in Chinese))
- [10] 翟成, 李贤忠, 李全贵. 煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应用[J]. *煤炭学报*, 2012, **36**(12): 1996 – 2001. (ZHAI Cheng, LI Xiao-zhong, LI Quan-gui. Research and application of coal seam pulse hydraulic fracturing technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, **36**(12): 1996 – 2001. (in Chinese))
- [11] 温庆志, 翟恒立, 罗明良, 等. 页岩气藏压裂支撑剂沉降及运移规律实验研究[J]. *油气地质与采收率*, 2012, **19**(6): 104 – 107. (WEN Qing-zhi, ZHAI Heng-li, LUO Ming-liang, et al. Study on proppant settlement and transport rule in shale gas fracturing[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, **19**(6): 104 – 107. (in Chinese))
- [12] 郭建春, 曾凡辉, 余东合, 等. 压裂水平井支撑剂运移及产量研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2009, **31**(4): 79 – 82. (GUO Jian-chun, ZENG Fan-hui, YU Dong-he, et al. Study on fractured horizontal well proppant migration and the productivity[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2009, **31**(4): 79 – 82. (in Chinese))