

高水平应力差下水平井螺旋射孔参数优化研究*

吴越¹, 侯冰¹, 韩慧芳², 周小金²

(1. 中国石油大学(北京) 油气资源与工程国家重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石油西南油气田分公司工程技术研究院, 四川 广汉 618300)

摘要:在压裂施工中,射孔是一个重要环节。射孔能够降低岩石破裂压力,减少近井筒缝网结构的复杂性,有利于水力压裂之后的油井增产。通过开展大尺寸真三轴室内实验,研究水平应力差大小以及在高水平应力差下射孔相位、射孔密度和射孔簇间距对于裂缝的形态、裂缝面的扩展和岩石破裂压力的影响。实验证明:在高水平应力差下,由于地层的各向异性,导致地层的能量不稳定性,有利于相邻裂缝扩展的相互影响,减少近井筒附近的裂缝的复杂性,同时减少岩石的破裂压力;在高水平应力差下,射孔相位增大时,射孔间距变大,不利于相邻裂缝的沟通,增加了近井筒裂缝的复杂的可能性。通过物模实验表明,与射孔相位为 90° 相比,射孔相位为 60° 形成的单一平整裂缝扩展面更有利于油井增产,同时岩石破裂压力更小,有利于水力压裂;射孔簇间距适当增加,能够减少两簇之间的相互影响,能够增加多簇同时起裂的可能性,同时还能增加射孔过程中总的射孔起裂数量;射孔密度增加还能减少孔间距,减少相邻射孔之间相互影响的能量,减少近井筒裂缝的复杂性,同时还能够有效地减少岩石破裂压力。

关键词:水平应力差;螺旋射孔参数;裂缝形态;水力压裂;大尺寸三轴实验

中图分类号:TE348

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2019)01-0226-06

Study on the Optimization of Helical Perforation Parameters for Horizontal Wells in the Condition of High Horizontal Stress Difference

Wu Yue¹, Hou Bing¹, Han Huifang², Zhou Xiaojin²

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, P.R. China;

2. Engineering Research Institute, Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Guanghan, Sichuan 618300, P.R. China)

Abstract: Perforation is an important part of the fracturing operation. Perforation can reduce the rock fracture pressure, reduce the complexity of near-wellbore grid structure, and is conducive to the production of oil wells after hydraulic fracturing. By conducting large-scale true triaxial laboratory experiment, the effects of horizontal stress difference and perforation phase, perforation density, and perforation cluster spacing on the morphology of cracks, crack surface expansion, and rock fracture pressure under high horizontal stress difference were investigated. Experiments show that under the high level of stress difference, due to the anisotropy of the formation, the energy instability of the formation is conducive to the mutual influence of adjacent crack propagation, and the complexity of cracks near the near wellbore is reduced, and at the same time the rock fracture is reduced. In the condition of high horizontal stress difference, when the perforation phase increases, the perforation distance becomes larger, which is

* 收稿日期:2018-08-04(修改稿)

作者简介:吴越(1993-),男,吉林松原人,硕士生,主要从事油气井岩石力学与工程的研究。

E-mail:714802731@qq.com

基金项目:国家自然科学基金(51874328);中石油科技创新基金(2018D-5007-0307)

not conducive to the communication of adjacent cracks, and increases the complexity of near-wellbore cracks. Model experiments show that the single flat crack propagation plane forms with a perforation phase of 60° is more conducive to the production of oil wells than the perforation phase of 90° , and the rock fracture pressure is smaller, which is favorable to hydraulic fracturing; perforation; The greater the distance between perforation clusters, the less the two clusters are reduced. The mutual influence can increase the possibility of multiple cluster initiation and at the same time increase the total number of perforating cracks during perforation; The increased density can also reduce the spacing between holes, reduce the interaction energy between adjacent perforations, reduce the complexity of near-wellbore cracks, and can also effectively reduce rock fracture pressure.

Keywords: crustal stress difference; helical perforation parameter; fracture morphology; hydrofracture; large-scale true triaxial laboratory experiment

0 引言

20世纪末,水平井技术和水力压裂技术成为美国页岩气革命成功的关键技术,同时也引领了整个石油行业的发展趋势。水平井技术能够提高单井控制面积,再配合水力压裂技术,能够大大提高单井产量,增加油井利润^[1-2]。但是水力压裂仍然受到岩石破裂压力以及水力压裂后缝网结构等因素的困扰。国内一般采用螺旋射孔方式来降低岩石破裂压力,减少近井筒缝网结构的复杂性。

前人对于裂缝形态和裂缝扩展以及射孔方式对裂缝形态的影响进行了很多研究。Ansah 建立了一个全新的3D有限因素模型,将地层各项异性这一重要因素添加进去,研究射孔参数对裂缝的影响并对其进行优选。单清林等^[3]和张广清等^[4]通过有限元的方法进行数值模拟,研究射孔参数对裂缝起裂以及裂缝形态的影响。比起理论和数值模拟的方法,室内实验有真实性和明显性。Van等^[5]采用物理模拟实验,研究斜井中射孔相位对裂缝转向的影响。在他的实验中,相位为 180° 能够更好使裂缝相互沟通,而相位为 90° 时破坏了裂缝的沟通。侯冰等^[6]通过大尺寸真三轴室内实验研究大斜度井水力压裂裂缝影响因素,其中井斜角和射孔相位分别对裂缝的形态、裂缝的数量有影响。同时,还有人对于页岩^[7-8]和煤岩^[9-10]进行类似的研究,但是多数室内实验^[11-14]都是在低水平应力差的条件下进行,没有考虑在高水平应力差下,射孔参数对水力压裂裂缝的影响会变成怎样。本文开展大型真三轴室内物理模拟实验,研究在高水平应力差下射孔相位、射孔簇间距以及射孔孔密对于水力压裂裂缝形态以及近井筒裂缝复杂性的影响。

1 水力压裂物理模拟实验

1.1 水力压裂实验设备

本实验采用中国石油大学(北京)岩石力学实验室设计组建的大尺寸真三轴试验系统。实验系统由声发射仪、真三轴实验架、三轴液压稳压源、油水分离器、MTS增压及控制器、数据采集及处理系统等组成,其整体结构如图1所示^[15]。

1.2 水力压裂人工式样

此实验是使用水泥和石英砂按照体积比为1:1混合浇筑而成的混凝土式样,其大小为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 。用外径为14 mm、内径为10 mm的钢管模拟水平井筒,并在其上钻一定直径的圆孔。为了模拟射孔,在井筒上圆孔中塞入一定长度的直筒。为了模拟实际现场中的水平井,井筒方向为水平最小主应力方向。为了方便描述水力压裂的结果,本实验中从井筒头向下依次给每个射孔孔眼进行编号(例:A-1为第1簇第1个射孔孔眼,B-1为第2簇第1个射孔孔眼,依次类推)。

压裂液由3 g的胍胶与适量的水混合搅拌而成。同时为了方便观察实验结果,在压裂液搅拌时加入适量的荧光粉。实验过程中注入井筒的压裂液的排量为 0.3 ml/min 。

1.3 实验方案

实验主要研究为高水平应力差下(水平最大主应力、水平最小主应力和垂向应力分别为27 MPa、19 MPa、30 MPa),以及不同射孔参数下,由水力压裂形成的裂缝的起裂和扩展情况,还有射孔参数对岩石破裂压力的影响。按照相似理论^[16],在实验室中模拟现场施工的条件设计了不同的射孔参数,实验方案如表1。

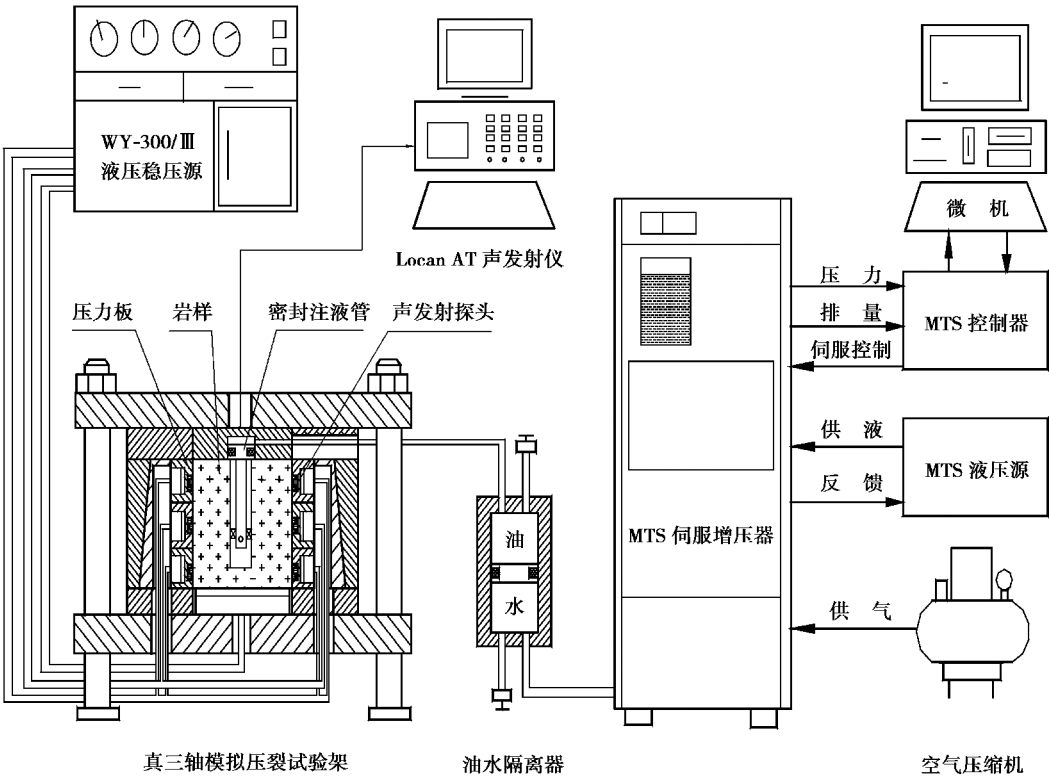


图 1 真三轴模拟实验系统

Fig. 1 True triaxial simulation system

表 1 实验方案

Table 1 Experimental scheme

编号	相位/(°)	簇间距/mm	孔密/孔/cm	水平应力差/MPa
1	60	20	12	8
2	60	20	12	3
3	90	20	12	8
4	60	40	12	8
5	60	20	18	8

表 2 实验结果

Table 2 Experimental results

编号	破裂压力/MPa	裂缝形态
1	21.4	射孔孔眼 A-2 A-3 起裂, 裂缝扩展面单一平整
2	23.8	射孔孔眼 A-5 B-4 B-5 起裂, 相互之间沟通不充分, 形成垂直井筒方向的多层独立扩展的裂缝面
3	22.27	射孔孔眼 A-2 A-3 A-4 起裂, 相互之间沟通不充分, 形成垂直井筒方向的多层独立扩展的裂缝面
4	24.8	射孔孔眼 A-1 A-2 A-3 起裂, 相互之间沟通不充分, 形成垂直井筒方向的分层扩展裂缝面 射孔孔眼 B-1 B-2 起裂, 相互沟通后形成垂直井筒方向的螺旋形裂缝面
5	18.7	射孔孔眼 A-1 起裂, 沿水平最大主应力扩展, 裂缝扩展面单一平整 射孔孔眼 B-4 B-5 B-6 起裂, 相互之间沟通不充分, 形成垂直井筒方向的多层独立扩展的裂缝面

其中 2 号实验的应力条件为水平最大主应力、水平最小主应力和垂向应力分别为 24 MPa、21 MPa、30 MPa, 而其他实验的应力条件为水平最大主应力、水平最小主应力和垂向应力分别为 27 MPa、19 MPa、30 MPa。全部实验方案中的射孔孔径根据现场施工条件以及室内实验的可行性设计为 2 mm 和 30 mm。按照实验方案做出 10 块人工式样, 在适宜的条件下静置一段时间, 使其达到实验要求, 防止人工混凝土式样的强度对实验产生影响。

2 实验结果

实验结束后,将人工混凝土试样沿着水力裂缝走向打开,结合岩石力学相关知识,发现水力裂缝的走向是沿着水平最大主应力方向,并且裂缝形态分为三种:单一平整裂缝面、多层独立扩展的裂缝面和螺旋形裂缝面。各组实验中的水力裂缝是这三种裂缝中的一种或者两种的结合。泵压曲线如图2所示,实验结果如表2所示,裂缝形态和扩展如图3所示。

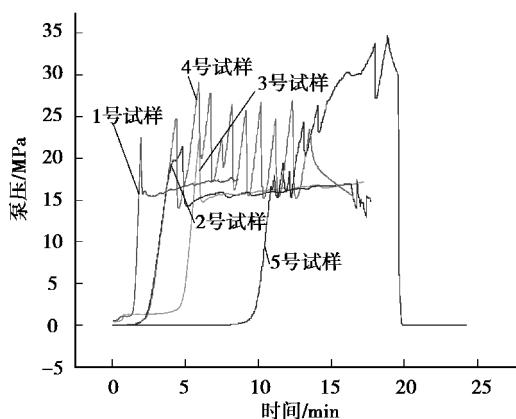


图2 泵压曲线

Fig. 2 Pump pressure curves

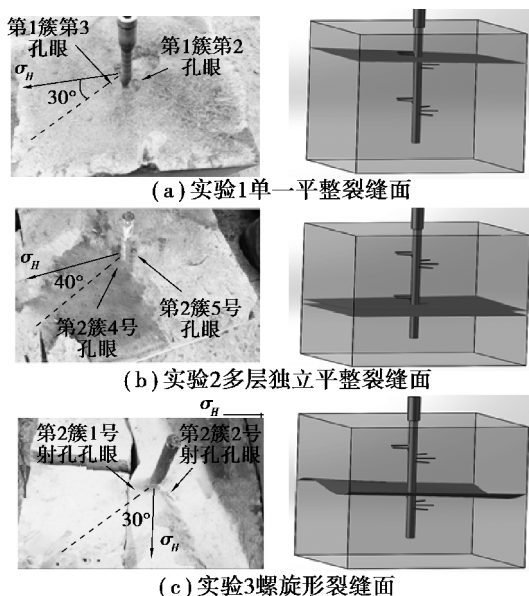


图3 水平井螺旋射孔水力裂缝形态和扩展

Fig. 3 The fracture morphology and expansion of helical perforation in horizontal well

3 水平应力差以及射孔参数影响分析

泵压曲线和试样的水力裂缝的形成和扩展息息相关。从泵压曲线中可以看出,1、3号试样的泵

压曲线都很简单,分为3部分。第1部分是压力随着时间的延长而快速增加,第2部分是当压力增加到某一个值时突然下降,第3部分是当压力下降到某个值时不再下降,而随着时间的增加而基本保持不变。这与试样在压裂过程中所产生的水力裂缝相对应,裂缝形态较为简单,泵压曲线就较为简单,同时也说明1号和3号试样的射孔是同时起裂的。2、4、5号试样也分为3部分。第1部分也是压力随着时间的延长而快速增加,第2部分则是压力不断重复着先降低在增加的过程,形成多个尖点,第3部分为压力的降低到极小值,实验停止。这与2、4、5号试样的裂缝形态相对应,裂缝形态较为复杂,泵压曲线就较为复杂。说明1号、4号和5号试样的射孔与2号和3号试样的射孔不同,是依次起裂的。

一般影响事物发展的因素分为环境因素和事物的自身因素。水平应力差就是环境因素,在射孔参数等因素相同的情况下,目的层的水平应力不同,水力压裂产生的裂缝也有差异。射孔参数则是水力压裂的自身因素,通过各种射孔参数的组合产生所需要的裂缝。

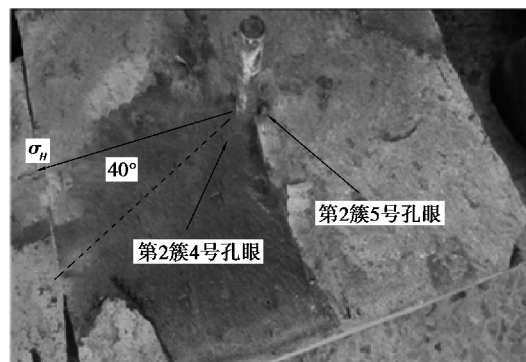


图4 地应力差为3 MPa的水力裂缝形态和扩展面

Fig. 4 Hydraulic fracture morphology and expansion surface of crustal stress difference with 3 MPa

3.1 水平应力差的影响

由1号和2号试样的实验结果对比,1号试样的2个起裂点相互沟通形成1个平整裂缝扩展面,而2号试样中形成3个独立的平整裂缝扩展面。这表示在高水平应力差下,地层的受力各向异性越大,地层本身的能量越不稳定,地层的不稳定性越大,这就导致地层中的裂缝更加容易互相影响。这也可以看出,在高水平应力差下,螺旋射孔后裂缝的复杂程度降低。同时从破裂压力可以看出,越高的水平应力差下,岩石的破裂压力越小。

3.2 射孔相位的影响

由1号和3号试样的实验结果对比,虽然1号

试样和 3 号试样的泵压曲线的变化趋势相类似,但是 1 号试样有 2 个射孔点起裂形成一个平整的裂缝扩展面,3 号试样有 3 个射孔起裂,形成 3 个独立的平整裂缝扩展面。这说明在高水平应力差下,相位越大,为了保证其他射孔参数的相同,就会导致孔间距变大。两个相邻射孔孔眼起裂形成的裂缝平面相互沟通所需能量越多,这对于相邻射孔孔眼的相互沟通不利,这使近井筒附近更容易产生复杂裂缝,降低改造之后油井的产量。同时从破裂压力可以看出,相位越大,岩石破裂压力越大。这说明在高水平应力差下,螺旋射孔应该选择较小的相位。

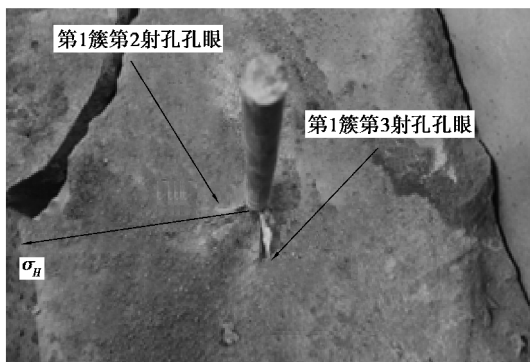


图 5 射孔相位为 90° 的水力裂缝形态和扩展面
Fig. 5 Hydraulic fracture morphology and expansion surface of perforating phase with 90°

3.3 射孔簇间距的影响

由 1 号和 4 号试样的实验结果对比,1 号试验只有第一簇中有射孔点起裂,而在 4 号试验中,第一簇和第二簇都有射孔点起裂。这表明在高水平应力差下,簇间距增加,第一簇和第二簇相互影响所需要的能量越大,这就降低了两簇之间的相互影响,更好地保证了每簇的独立性,能够使螺旋射孔时每簇都有射孔点起裂,同时使起裂射孔点增加。

3.4 射孔孔密的影响

由 1 号和 5 号试样的实验结果对比,5 号试样第一簇和第二簇都有射孔起裂,同时 5 号试样的总起裂点比 1 号试样的总起裂点多。这显示在高水平应力差下,高孔密时,射孔之间的距离减少,射孔之间相互影响所需能量减少,导致多孔起裂和多簇起裂。由于在高水平应力差下,5 号试样的第二簇射孔孔眼更容易起裂,相互沟通连接时间较短,导致螺旋幅度较大。从破裂压力来看,在高水平应力差下,孔密越高,岩石破裂压力越有效地降低,5 号试样的岩石破裂压力比 1 号试样的岩石破裂压力降低 12.6%。

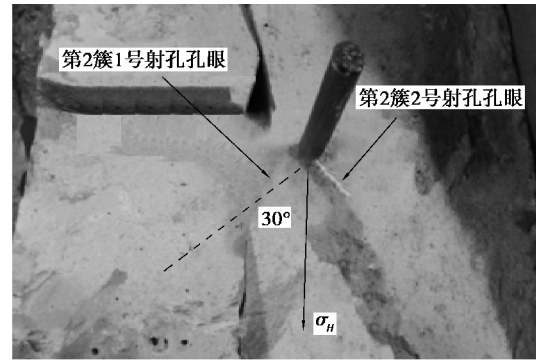


图 6 簇间距为 40 mm 的水力裂缝形态和扩展面
Fig. 6 Hydraulic fracture morphology and expansion surface of perforation interval spacing with 40 mm

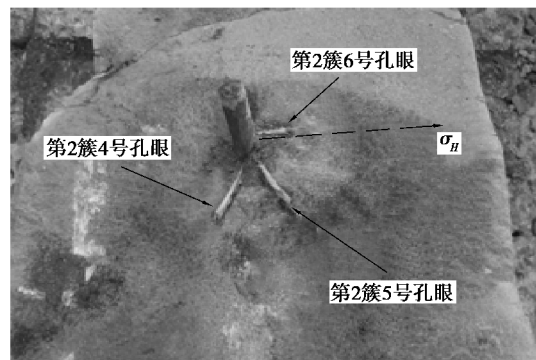


图 7 孔密为 18 孔/cm 的水力裂缝形态和扩展面
Fig. 7 Hydraulic fracture morphology and expansion surface of perforation density with 18 holes/cm

4 结论

(1)在高水平应力差下,由于地层的各向异性,导致地层的能量不稳定性,有利于相邻裂缝扩展的相互影响,减少近井筒附近的裂缝的复杂性,同时减少岩石的破裂压力。

(2)在高水平应力差下,射孔相位增大时,射孔间距变大,不利于相邻裂缝的沟通,增加了近井筒裂缝的复杂的可能性。通过室内实验表明,与射孔相位为 90°相比,射孔相位为 60°形成的单一平整裂缝扩展面更有利于油井增产,同时岩石破裂压力更小,有利于水力压裂。

(3)在高水平应力差下,射孔簇间距越大,减少两簇之间的相互影响,能够增加多簇同时起裂的可能性,同时还能增加射孔过程中总的射孔起裂数量。因此,在高水平地应力差下,应适当增加簇间距,从室内试验结果看,射孔簇间距为 40 mm 时,射孔和水力压裂效果更好,有利于油井的增产。

(4)在高水平应力差下,射孔密度增加还能减少孔间距,减少相邻射孔之间相互影响的能量,减

少近井筒裂缝的复杂性;射孔密度增加能够有效地减少岩石破裂压力,减少了水力压裂的困难。比较2组试验的岩石破裂压力,18孔/m的射孔方式的岩石破裂压力比12孔/m射孔方式的岩石破裂压力降低了12.6%。

参考文献(References)

- [1] 王永辉,卢拥军,李永平,等.非常规储层压裂改造技术进展及应用[J].石油学报,2012,33(1):149-158. (Wang Yonghui, Lu Yongjun, Li Yongping, et al. Progress and application of hydraulic fracturing technology in unconventional reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 149-158. (in Chinese))
- [2] Mayerhofer M J, Lon E P, Warpinski N R, et al. What is stimulated reservoir volume [R]. SPE 119890, 2010.
- [3] 单清林,金衍,王亚军,等.螺旋射孔多孔眼起裂裂缝形态有限元模拟[J].中国海上油气,2017,29(4):123-130. (Shan Qinglin, Jin Yan, Wang Yajun, et al. FEM simulation of crack initiation in spiral perforated porous eyes[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(4): 123-130. (in Chinese))
- [4] 张广清,陈勉,殷有泉,等.射孔对地层破裂压力的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(1):40-44. (Zhang Guangqing, Chen Mian, Yin Youquan, et al. Study on influence of perforation on formation fracturing pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 40-44. (in Chinese))
- [5] Van P R G, Pater C J. Impact of perforations on hydraulic fracture tortuosity [J]. SPE Production and Facilities, 1999, 14(2): 117-130.
- [6] 侯冰,张儒鑫,刁策,等.大斜度井水力压裂裂缝扩展模拟实验分析[J].中国海上油气,2016,28(5):85-91. (Hou Bing, Zhang Ruxin, Diao Ce, et al. Experimental study on hydraulic fracture propagation in highly deviated wells [J]. Chinese Offshore Oil and Gas, 2016, 28(5): 85-91. (in Chinese))
- [7] 杨焦生,王一兵,李安启,等.煤岩水力裂缝扩展规律试验研究[J].煤炭学报,2012,37(1):73-77. (Yang Jiaosheng, Wang Yibing, Li Anqi, et al. Experimental study on hydraulic crack propagation of coal rock [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 73-77. (in Chinese))
- [8] 张羽,张遂安,刘元东,等.煤岩水力压裂裂缝扩展规律实验研究[J].中国煤炭地质,2015,27(8):21-25. (Zhang Yu, Zhang Zhaoan, Liu Yuandong, et al. Experimental study on the crack propagation law of coal hydraulic fracturing [J]. China Coal Geology, 2015, 27(8): 21-25. (in Chinese))
- [9] 侯冰,陈勉,程万,等.页岩气储层变排量压裂的造缝机制[J].岩土工程学报,2014,36(11):2149-2152. (Hou Bing, Chen Mian, Cheng Wan, et al. Fracture mechanism on shale gas reservoir fracturing with variable pump rate [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(11): 2149-2152. (in Chinese))
- [10] 李芷,贾长贵,杨春和,等.页岩水力压裂水力裂缝与层理面扩展规律研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(1):12-20. (Li Zhi, Jia Changgui, Yang Chunhe, et al. Study on hydraulic fractures and evolution of bedding surfaces in hydraulic fracturing of shales [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 12-20. (in Chinese))
- [11] Hou B, Chen M, Cheng W, et al. Investigation of hydraulic fracture networks in shale gas reservoirs with random fractures [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2015, 41(7): 1-11.
- [12] Hou B, Chen M, Li Z, et al. Propagation area evaluation of hydraulic fracture networks in shale gas reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 833-838.
- [13] 侯冰,陈勉,张保卫,等.裂缝性页岩储层多级水力裂缝扩展规律研究[J].岩土工程学报,2015,37(6):1041-1046. (Hou Bing, Chen Yu, Zhang Baowei, et al. Multi-level hydraulic fracture propagation in fractured shale reservoirs [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 1041-1046. (in Chinese))
- [14] Behrmann L A, Elbel J L. Effect of perforations on fracture initiation [J]. Journal of Petroleum Technology, 1991, 43(5): 608-615.
- [15] 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,2000,19(增):868-872. (Chen Mian, Pang Fei, Jin Yan. Simulation and analysis of large-scale true triaxial hydraulic fracturing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Supp.): 868-872. (in Chinese))
- [16] 柳贡慧,庞飞,陈治喜.水力压裂模拟试验中的相似准则[J].西安石油大学学报(自然科学版),2000,24(5):45-48. (Liu Gonghui, Pang Fei, Chen Zhixi. Development of scaling laws for hydraulic fracture simulation tests [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2000, 24(5): 45-48. (in Chinese))