

缺陷储层重复压裂实验研究

韩忠英, 薛世峰, 朱秀星

(中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 首次利用大尺寸真三轴岩石力学实验系统, 对缺陷储层重复压裂后裂缝的分布进行了研究。实验结果表明: 应力重定向对新裂缝的分布情况影响较大; 对缺陷储层进行水力压裂, 当外加载荷达到某一临界值时, 储层中的缺陷被激活, 并产生比较复杂的裂缝; 重复压裂时, 新裂缝是否沿预置裂缝扩展在很大程度上受地应力状态、地质条件等因素控制; 尤其是在较高的均匀压应力状态下, 缺陷储层中新裂缝的产生方位可能与预置裂缝无关。

关键词: 重复压裂; 缺陷; 预置裂缝; 围压; 地应力

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)03-0567-04

作者简介: 韩忠英(1979-), 女, 山东乳山人, 博士研究生, 主要从事油气田地下工程力学方面的研究。E-mail: hzy_0218@163.com。

Experimental study on re-fracturing in defective reservoirs

HAN Zhong-ying, XUE Shi-feng, ZHU Xiu-xing

(College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: The distributions of fractures after re-fracturing in defective reservoirs are studied by using a series of large size true tri-axial test systems for the first time. The experimental results show that the stress redirection has a great impact on the distribution of new cracks. When the load reaches a certain critical value, defects will be activated during hydraulic fracturing, and more complex fractures will be formed. Whether new fractures propagate along the preset fracture or not largely depends on the stress state, geological conditions, and so on. Especially under the higher uniform stress, the direction of new fractures has nothing to do with the preset ones.

Key words: re-fracturing; defect; preset fracture; confining pressure; in-situ stress

0 引言

重复压裂作为一项增产增注技术,最早于20世纪50年代开始实施。目前重复压裂技术已成为提高油气田采收率的重要手段之一。在重复压裂过程中,地层新裂缝的启裂与扩展主要受压裂液性质、地层岩性、结构特征、地应力状态以及射孔方位等因素的影响。近年来,国内外进行了大量的实验研究,结果表明天然裂缝的存在对水力压裂后裂缝的扩展影响较大。陈勉等^[1-2]进行了随机裂缝性储层的压裂实验,把天然裂缝系统中的裂缝扩展模式分为主缝多分支缝和径向网状扩展两种形式,但仅考虑了一次压裂后裂缝的扩展情况。金衍等^[3-4],周健等^[5]通过实验研究了裂缝性油气藏中水力裂缝与天然裂缝相交后裂缝的扩展机理。Beugelsdijk等^[6]认为,在构造应力场作用下,水力裂缝与天然裂缝干扰后变得更加扭曲。Meng^[7]通过实验研究表明,围压较高时,水力裂缝更容易沿天然裂缝扩展。Peacock等^[8]通过研究认为,在碳酸盐岩地层中,水力裂缝的扩展情况与岩性、地质构造、天然裂缝参

数、流体压力和原地应力分布及局部扰动等因素有关。Warpinski等^[9]实验研究表明,随机天然裂缝会造成大量流体滤失及多裂缝分支,导致主裂缝沿着天然裂缝方向扩展。Olson等^[10]利用实验验证了水力裂缝与天然裂缝相互作用后3种可能的扩展形态。本文首次利用中国石油大学(华东)自行研制的大型真三轴岩石力学实验系统,研究了储层缺陷、地应力变化、预置裂缝等多因素对重复压裂后新裂缝产生和扩展的影响。

1 实验设备及试样制备

1.1 实验设备

本研究所采用的大型真三轴岩石力学实验系统主要由三轴高压缸、液压动力泵组、伺服控制系统、主控计算机、量测系统5部分组成,可实现加载与实验过程自动测控,控制精度较高。其中三轴高压缸的内

基金项目: 国家科技重大专项课题项目(2008ZX05031-002-003-001)

收稿日期: 2012-03-07

径为 800 mm，模拟实验试件尺寸最大可达 500 mm×500 mm×800 mm，工作压力最高可达 40 MPa。其可模拟试件尺寸与载荷水平两个关键指标目前均处于国内领先水平。主要改进设计部分——三轴高压缸基本结构如图 1 所示。

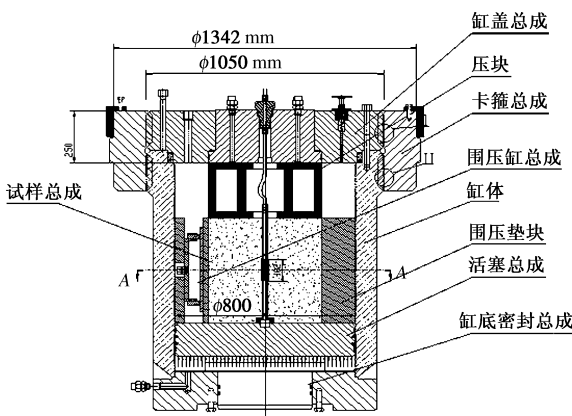


图 1 三轴高压缸结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of triaxial high-pressure cylinder

1.2 试样制备

受天然大岩样加工条件的限制，本实验采用混凝土试样进行实验。水泥和石英砂按照 1：1 进行配比制作试样，试件为 500 mm×500 mm×500 mm 的立方体，模拟井眼直径 20 mm，预置缝由长 80 mm，高 80 mm 的普通塑料薄片制成，均匀布孔，孔径为 1.5 mm，共设计 16 孔。人造试样平面示意图如图 2 所示，设沿预置缝方向为 x 方向。

缺陷的制备方法是采用在试样制备的过程中，随机添加 6~8 个大小不等且形状不规则、方向各异的不渗透微小薄片。试样制备后取不含缺陷的圆柱形岩心进行岩石力学参数测试，测得弹性模量为 2.5 GPa，泊松比为 0.23。

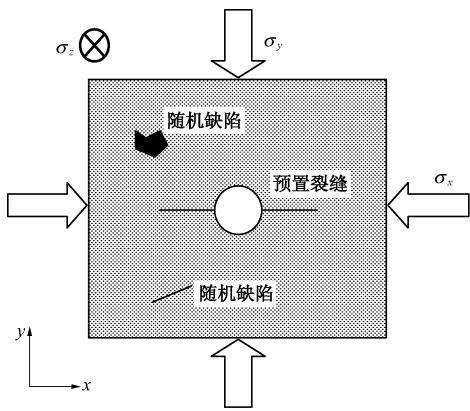


图 2 人造试样平面示意图

Fig. 2 Schematic map of artificial rock sample

1.3 实验参数及条件设置

该实验共设计了 6 块试样，由于首次使用该设备，除#1 试样用于调试设备、测试岩样性能外，其它

5 块试样分别模拟了预置裂缝、内置缺陷、地应力变化等不同工况下，重复压裂裂缝启裂方位与裂缝扩展情况，设计方案见表 1。

表 1 重复压裂模拟实验设计方案

Table 1 Experimental schemes of re-fracturing simulation

试样 编号	一次压裂			二次压裂			实验条件
	σ_x /MPa	σ_y /MPa	σ_z /MPa	σ_x /MPa	σ_y /MPa	σ_z /MPa	
#1	0	0	0	—	—	—	设备调试
#2	3	3	3	3	4	5	缺陷
#3	2	3	4	3	2	4	预置裂缝
#4	4	4	4	1	2	3	预置裂缝+缺陷
#5	3	4	5	2	1	5	预置裂缝
#6	3	4	5	—	—	—	预置裂缝+缺陷

2 实验结果及分析

2.1 地层缺陷对水力压裂新裂缝分布的影响

岩石自身结构中各种尺度的缺陷使岩石的强度具有分散性^[1]，从而减弱岩石抵抗外力作用的能力。不同大小和方向的缺陷分布，在外载荷作用下，试样中的缺陷将被激活，这些活化缺陷在载荷作用期间扩展，最后互相兼并导致试样破坏。本实验通过改变三轴应力大小的方法来研究缺陷地层水力压裂时裂缝形成规律。

如图 3，4 所示，#2 试样第一次压裂，施加均匀围压 3 MPa，从试样表面和压裂曲线上看，产生一条水平主裂缝，最高泵压为 6.5 MPa。改变应力大小进行二次压裂，沿某一缺陷方向产生一条垂直主裂缝，受缺陷影响，最高泵压仅为 2.4 MPa。

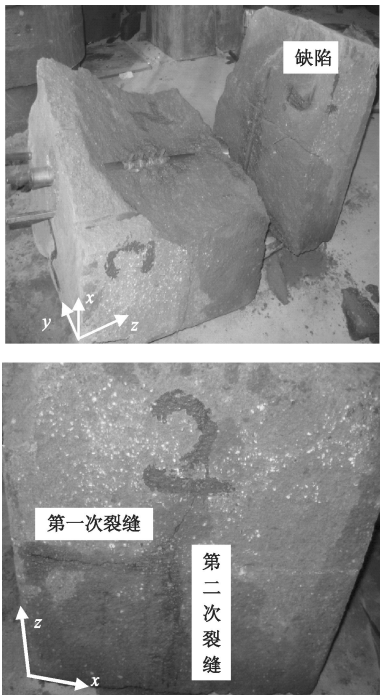


图 3 试样 2 的实验结果

Fig. 3 Test result of sample No. 2

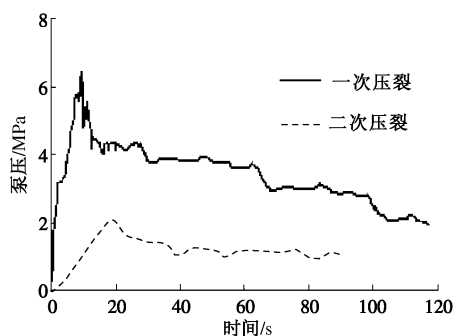


图4 试样2的实验曲线

Fig. 4 Test curves of sample No. 2

由此可见,对缺陷地层进行水力压裂实验,当外加载荷达到某一临界值时,随机缺陷被激活,试样中可能产生比较复杂的裂缝。而进行二次压裂时,未闭合的一次裂缝与随机缺陷的共同作用,使破裂压力进一步降低。

2.2 预置裂缝对重复压裂新裂缝分布的影响

一般研究认为,预置裂缝的存在将产生诱导应力,改变井筒周围的地应力场,一定程度上影响重复压裂后裂缝的扩展方向。根据实验结果,如图5所示,对#3试样进行一次压裂,沿预置裂缝方向施加最大水平主应力,压裂中最高泵压为6.0 MPa,预置裂缝沿原方向扩展。改变应力方向,使最大水平主应力垂直于预置裂缝方向,对其进行二次压裂,由于未闭合的一次裂缝的疏导作用,在距离井筒较远处的预置裂缝前缘产生二次裂缝,且压裂中最高泵压仅为4.2 MPa,二次裂缝的方向基本垂直于一次裂缝。同样#5试样(如图6所示),通过改变应力场,施加如表1所示的应力时,先后产生两条相互垂直的明显裂缝。

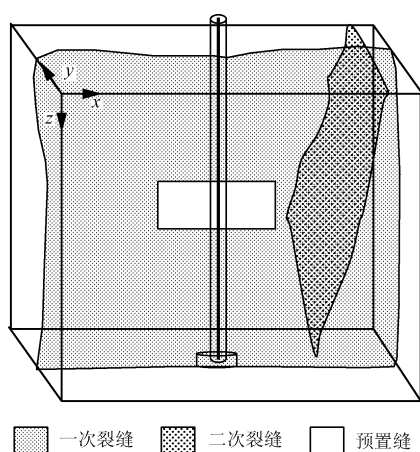


图5 试样3的实验结果示意图

Fig. 5 Test result of sample No. 3

分析原因,当远场应力发生改变时,由于初次水力压裂裂缝的疏导作用,重复压裂后,可能在水力裂缝前缘产生新的裂缝,新裂缝的方位仍受远场应力控制。

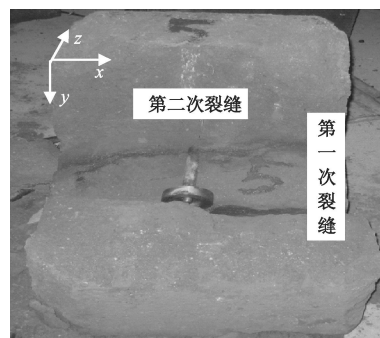


图6 试样5的实验结果

Fig. 6 Test result of sample No. 5

2.3 储层缺陷对重复压裂新裂缝分布的影响

根据文献[12],在均匀物体的内部如果存在物理性质相异的局部区域,这样的区域称为异性夹杂。实验中的缺陷可视为异性夹杂。而材料中夹杂与夹杂,夹杂与裂纹之间相互作用后其应力场将发生改变,材料的强度降低[13-15]。

#4试样(如图7所示),在较高的均匀围压下,进行重复压裂时,预置裂缝闭合,受随机缺陷的影响,在垂直于预置缝方向产生一条主裂缝。再次压裂时,主裂缝方向保持不变。而同样由于受缺陷影响,#6试样当压力仅为3.0 MPa时,即在岩样表面产生两条明显裂缝,导致试样完全裂开。

实验证明,在重复压裂过程中,新裂缝是否沿预置裂缝扩展在很大程度上受地应力状态、地质条件等因素控制。尤其是在较高的均匀压应力状态下,缺陷储层中新裂缝产生的方位可能与预置裂缝方向无关。

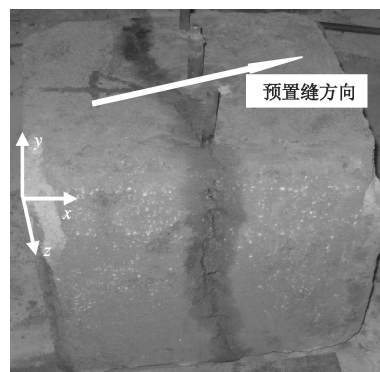


图7 试样4的实验结果

Fig. 7 Test result of sample No. 4

3 结 论

(1) 利用大尺寸真三轴实验设备,在一定程度上克服了尺寸效应对实验结果的影响。

(2) 储层中缺陷的存在降低了岩石的强度,导致水力压裂时地层中形成多个复杂裂缝。

(3) 重复压裂中,新裂缝产生和扩展方向受地应

力状态控制,地应力大小方向发生改变时,新裂缝方向也将随之发生变化。

(4) 重复压裂中,新裂缝是否沿原裂缝扩展在很大程度上受地应力状态、地质条件等因素控制。尤其是在较高的均匀压应力状态下,预置裂缝闭合,缺陷储层中新裂缝的方位可能与原裂缝方向无关。

参考文献:

- [1] 陈勉,周健,金衍,等. 随机裂缝性储层压裂特征实验研究[J]. 石油学报, 2008, **29**(3): 431 - 433. (CHEN Mian, ZHOU Jian, JIN Yan, et al. Experimental study on fracturing features in naturally fractured reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, **29**(3): 431 - 433. (in Chinese))
- [2] 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**(增刊): 868 - 872. (CHEN Mian, PANG Fei, JIN Yan. Experiments and analysis on hydraulic fracturing by a large-size tri-axial simulator[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(S0): 868 - 872. (in Chinese))
- [3] 金衍,张旭东,陈勉. 天然裂缝地层中垂直井水力裂缝起裂压力模型研究[J]. 石油学报, 2005, **26**(6): 113 - 114. (JIN Yan, ZHANG Xu-dong, CHEN Mian. Hydraulic fracturing initiation pressure models for vertical wells in naturally fractured formations[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, **26**(6): 113 - 114. (in Chinese))
- [4] 金衍,陈勉,周健,等. 岩性突变体对水力裂缝延伸影响的实验研究[J]. 石油学报, 2008, **29**(2): 300 - 303. (JIN Yan, CHEN Mian, ZHOU Jian, et al. Experimental study on the effects of salutatory barrier on hydraulic fracture propagation of cement blocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, **29**(2): 300 - 303. (in Chinese))
- [5] 周健,陈勉,金衍,等. 裂缝性储层水力裂缝扩展机理试验研究[J]. 石油学报, 2007, **28**(5): 109 - 113. (ZHOU Jian, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experimental study on propagation mechanism of hydraulic fracture in naturally fractured reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, **28**(5): 109 - 113. (in Chinese))
- [6] BEUGELSDIJK L J L, PATER C J, SATO K. Experimental hydraulic fracture propagation in a multi-fractured medium[C]// SPE Asia Pacific Conference. Yokohama, 2000.
- [7] MENG Chun-fang. Hydraulic fracture propagation in pre-fractured natural rocks[C]// SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition. Texas, 2011.
- [8] PEACOCK D C P, MANN A. Controls on fracturing in carbonate rocks[C]// The 14th SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. Bahrain, 2005.
- [9] WARPINSKI N R, LORENZ J C, BRANAGAN P T, et al. Examination of a cored hydraulic fracture in a deep gas well[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas, 1991.
- [10] OLSON J E, BAHORICH B, HOLDER J. Examining hydraulic fracture-natural fracture interaction in hydrostone block experiments[C]// SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. Texas, 2012.
- [11] 邓跃红. 岩石材料强度与材料内部缺陷分布分形性质[J]. 矿业研究与开发, 2001, **21**(6): 13 - 15. (DENG Yue-hong. Dimension stone strength and fractal characteristics of inner fault distribution[J]. Mining Research & Development, 2001, **21**(6): 13 - 15. (in Chinese))
- [12] 张宏图,折晓黎. 夹杂理论及其在断裂研究中的应用[J]. 物理学报, 1981, **30**(6): 761 - 773. (ZHANG Hong-tu, ZHE Xiao-li. Theory of inclusion and applications in the study of fracture[J]. Acta Physica Sinica, 1981, **30**(6): 761 - 773. (in Chinese))
- [13] CHEN Yi-heng, HASEBE N. A consistency check for strongly interacting multiple crack problems in isotropic, bimaterial and orthotropic bodies[J]. International Journal of Fracture, 1998, **89**(4): 333 - 353.
- [14] 黄春平,李中华. I 型裂纹与任意形状夹杂间的作用力[J]. 上海交通大学学报, 2005, **39**(1): 142 - 146. (HUANG Chun-ping, LI Zhong-hua. An approximate solution for the interaction forces between model I crack and an inclusion of arbitrary shape[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, **39**(1): 142 - 146. (in Chinese))
- [15] 张明焕,汤任基. 裂纹与弹性夹杂的相互影响[J]. 应用数学与力学, 1995, **16**(4): 289 - 300. (ZHANG Ming-huan, TANG Ren-ji. Interaction between crack and elastic inclusion[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1995, **16**(4): 289 - 300. (in Chinese))