

煤层气井真三轴压裂实验

董光

中国石化华北分公司工程技术研究院, 郑州 450006

摘要 为进一步认识煤层气井压裂裂缝起裂和扩展机制,利用真三轴大尺寸水力压裂实验系统,采用取自矿区原煤煤块制作的试样,通过真三轴压裂实验,研究了不同围压组合条件下煤层压裂裂缝的起裂和扩展特征。研究表明:地应力状态和煤层中发育的天然裂隙对压裂裂缝的起裂和扩展有着直接影响。小规模天然裂隙的存在使得裂缝扩展压力出现频繁小幅波动,压裂裂缝在扩展过程中多见路径转向,压裂过程中煤层天然裂隙的大量开启造成压裂液大量滤失直接损耗压裂时的水力载荷,不利于压裂形成高导流能力的水力裂缝。当三向主应力差较小时,煤层压裂产生的裂缝宏观形态更为复杂,可能会同时产生垂直缝和水平缝。

关键词 煤层气井;水力压裂;真三轴应力;天然裂隙;裂缝扩展

中图分类号 TE37

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.01.007

Hydraulic fracturing experiment of coalbed methane well under triaxial stress

DONG Guang

Research Institute of Engineering and Technique, Huabei Sub-Company, Sinopec Group, Zhengzhou 450006, China

Abstract For further understanding of hydraulic fracture initiation and propagation mechanisms of coalbeds, hydraulic fracturing experiments under triaxial stress were carried out on the raw coal specimens from a coalmine with a large-size true triaxial hydraulic fracturing test system. The initiation and propagation characteristics of coalbed hydraulic fracture were studied under different triaxial stress states. The experimental results indicate that the stress state and coal cleat had a direct effect on hydraulic fracture initiation and propagation. The existence of small-scale cleat caused the hydraulic fracture propagation pressure to fluctuate frequently within a narrow range. The swerve of many fracture propagation paths was observed, and the filtration of fracturing fluid led to loss of propagation pressure. These problems are not conducive to the formation of high conductivity hydraulic fracture. The coalbed hydraulic fracture will be more complex with lesser degree of principle stress difference, and horizontal and vertical fractures may be both generated. This experiment may provide references for further exploration of coalbed fracturing mechanisms.

Keywords coalbed methane well; hydraulic fracturing; triaxial stress; cleat; fracture propagation

水力压裂是煤层气开采过程中一项非常重要的增产手段^[1-4]。现场压裂施工的研究中缺乏对地下煤层压裂裂缝可视化的有效监测手段,基于理想化假设的煤层压裂数值模拟研究则很难真实地反映煤层压裂裂缝的真实扩展规律^[5-8]。煤层压裂室内实验可以直接监测裂缝起裂和扩展的过程,也方便直接观察压裂结果,而煤层拟三轴压裂实验中试样均处在两个水平主应力相等的应力状态中,与绝大多数煤层气储层处在两个水平主应力不相等的应力场中的客观事实不

符^[9-14]。真三轴压裂实验能真实反映煤层压裂时所处的三轴应力环境,而目前有关煤层真三轴压裂实验的文献报道并不多见。因此,开展煤层真三轴压裂室内实验,对进一步探究煤层压裂机制有着十分积极的意义。

1 煤层真三轴水力压裂实验系统

实验系统主要由MTS伺服压裂液泵注系统、真三轴模拟压裂实验架、围压系统和辅助装置组成,如图1所示。

收稿日期:2014-07-01;修回日期:2014-09-24

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05045)。

作者简介:董光,博士,研究方向为油气田开发及储层改造,电子信箱:huabeidg@126.com

引用格式:董光.煤层气井真三轴压裂实验[J].科技导报,2015,33(1):43-46.

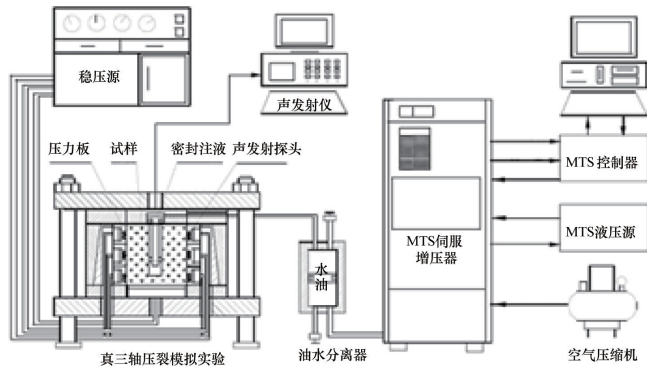


图1 真三轴水力压裂试验系统示意
Fig. 1 Triaxial hydraulic fracturing experimental system

实验所用的真三轴压裂模拟实验架(实验架内壁尺寸300 mm×300 mm×300 mm)能以真三轴加载的方式,更接近真实的地应力状态。真三轴压裂模拟实验架如图2(a)所示。实验中压裂液的泵注是利用MTS伺服增压泵,如图2(b)所示,按照预先设置的泵注程序进行压裂液注入。泵注过程中,MTS数据采集系统可以记录泵注压力和排量等参数。

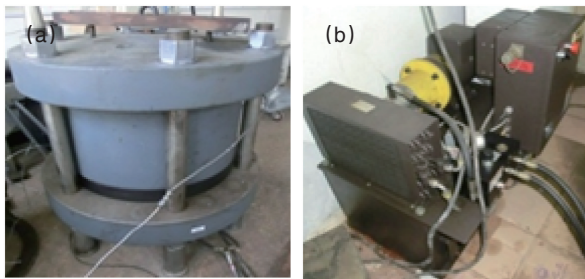


图2 真三轴压裂模拟实验架(a)及MTS伺服增压泵(b)
Fig. 2 Triaxial fracturing experimental fixture (a) and fluid injection system (b)

1.1 实验方案

总共制作4个试样,每个试样施加不同的围压组合,研究不同围压组合下的压裂裂缝扩展情况,依据目标层位的地应力环境,围压设置见表1。

表1 实验方案
Table 1 Experimental scheme

编号	垂向 主应力/MPa	最大水平 主应力/MPa	最小水平 主应力/MPa
试样1	4	4.0	4
试样2	6	4.5	2
试样3	7	6.0	4
试样4	5	5.0	4

1.2 试样制备

试样使用原煤煤块(图3(a),弹性模量4500 MPa,泊松比0.38,抗压强度26.7 MPa)、425牌号的建筑水泥、精制石英砂和水制作。将原煤煤块放置于模具(模具内壁尺寸:300 mm×300 mm×300 mm)的中心位置,记录煤块上顶面距离模具上平面的距离,然后将准备好的混凝土(水泥和石英砂质量比为1:1)灌入模具,如图3(b)所示。浇铸成型后养护30 d以上,然后将已经具有一定强度的试样,利用立式钻床钻出直径14 mm,长度合适(根据煤块上顶面与模具上平面的距离确定,要保证煤块内有20 mm的裸眼井段)的钻孔。对钻孔经过清洗和干燥后,将外径10 mm,内径6 mm,长度根据每个试样具体而定的钢制注液管放入钻孔内,用环氧树脂胶结钻孔环空,制作完成后的试验尺寸:300 mm×300 mm×300 mm,如图3(c)所示。

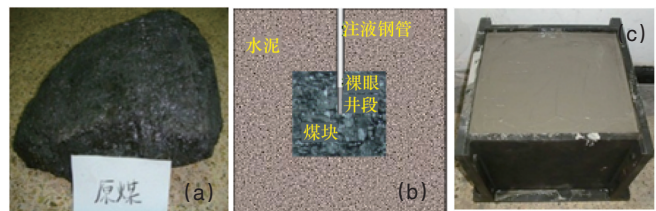


图3 原煤煤块(a)、试样结构(b)、刚浇铸完成的试样(c)示意
Fig. 3 Raw coal (a), specimen construction (b) and completed testing specimen (c)

2 煤层真三轴压裂实验及分析

试样、压裂液以及实验系统调试就绪之后:1) 将制作好的试样放入实验架,安装好相关部件;2) 由稳压源施加三个方向的围压,待围压达到预设值后,根据设定的泵排量向模拟钻孔中泵注压裂液,并同时开启数据采集系统,记录注入压力、排量等参数,泵注速度以活塞缸移动速度为依据,此次实验设定为0.01 mm/s(相当于排量:0.126 cm³/min);3) 完成泵注程序后,卸去围压,从实验架上取下试样,观察记录试样破裂情况。结合实验曲线(图4),分析实验结果。

图4(a)和图5(a)为试样1的压裂曲线和试样裂缝扩展示意。实验过程中,试样1所加3个方向的围压相等,压裂曲线破裂压力点不明显,在整个压裂过程中曲线波动频繁。打开实验后的试样发现,煤块在压裂后产生了很多裂缝,裂缝起裂和扩展受控于天然裂隙,主裂缝不明显,裂缝规模不等,形态复杂,裂缝起裂和扩展具有随机性,主要受控于天然裂隙,压裂液在天然裂隙中滤失严重。

图4(b)和图5(b)为试样2的压裂曲线和试样裂缝扩展示意。压裂曲线无明显的破裂压力点。观察实验后的试样发现井眼附近产生了2条与最大水平主应力呈约5°和15°夹角的不对称主裂缝,且裂缝形状不规则。井眼附近除了有两条主裂缝之外,还发现多条小规模天然裂隙开启造成压裂液

滤失的迹象;主裂缝壁面附近伴有压裂液滤失、微裂隙张开的痕迹;其中一条主裂缝在扩展一定距离后由于与天然裂隙相遇,向前的持续扩展被终止,扩展方向发生了约35°的转向。三向主应力的差异导致了裂缝总体扩展趋势与最大主应力方向一致。

图4(c)和图5(c)为试样3的压裂曲线和试样裂缝扩展示意。压裂曲线破裂压力点十分明显。试样中有2条主裂缝产生,两条主裂缝在井眼附近的部分近似与最大水平主应力方向一致,之后在扩展过程中由于受天然裂隙的干扰均产生一定角度的弯曲转向,其中一条伴有近似Y型分支裂缝。该试样的围压条件与试样2较为类似,但压裂曲线的波动却存在较大差异,说明煤层压裂裂缝的起裂和扩展受压裂区域天然

裂隙发育特征的直接影响,造成煤层压裂裂缝的扩展路径具有不可预测的随机性。

图4(d)和图5(d)为试样4的压裂曲线和试样裂缝扩展示意。试样4所加的三向围压值中垂向主应力和最大水平主应力相等。该试样在压裂过程中的破裂压力点同样不明显。打开实验后的试样,发现井眼周围起裂了多条大小不一的裂缝,其中两条扩展距离相对较长,裂缝的扩展路径同样存在转折的现象。值得注意的是,在煤块与水泥的上界面处存在一个近似椭圆(长轴约为13 cm,短轴约为7 cm)的水平压裂液滤失区域,该区域的煤块与水泥已经完全分离,说明该处在压裂时有水平缝产生,因此在垂向应力和水平应力之间差异不太大时存在产生T型复杂裂缝的可能性。

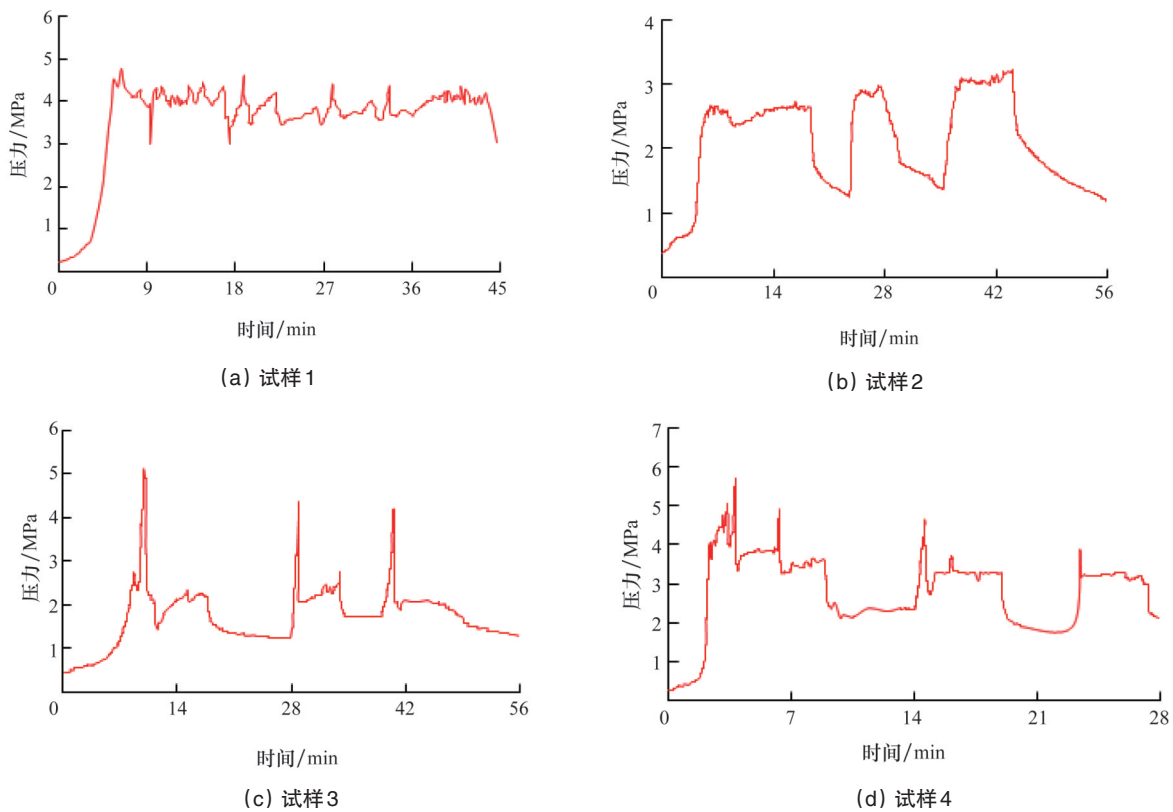
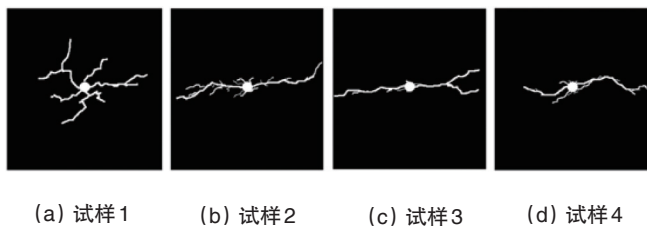


图4 试样实验曲线

Fig. 4 Curves showing the experimental results



(a) 试样1 (b) 试样2 (c) 试样3 (d) 试样4

图5 试样裂缝扩展示意

Fig. 5 Diagrammatic sketch of fracture propagation

3 结论

1) 实验证实,地应力和煤层中发育的天然裂隙对压裂裂缝的起裂和扩展有直接影响,造成压裂过程中压力的频繁波动,使压裂裂缝在扩展过程中发生转向形成不规则裂缝形态;煤层天然裂隙的大量开启会造成压裂液的大量滤失,损耗压裂过程中的水力载荷,均不利于压裂形成高导流能力的水力裂缝。

2) 三向主应力的差异使得压裂裂缝一般首先在最大主应力方向或与最大主应力方向呈一定夹角的天然裂隙处起

裂,而井周天然裂隙的存在,会使得井周出现多处起裂,在起裂时破裂压力也并不明显。

3) 在裂缝扩展过程中,当与天然裂隙相遇时(尤其是以较小的夹角相遇时),压裂裂缝的扩展路径会因受到干扰而发生沿天然裂隙的转向。

4) 当3个方向的主应力差值较小时,煤层压裂产生的裂缝宏观形态更为复杂,会同时产生垂直缝和水平缝。

参考文献(References)

- [1] Wei H, Li L, Wu X, et al. The analysis and theory research on the factor of multiple fractures during hydraulic fracturing of CBM wells[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2011, 3: 231-237.
- [2] Jing X. An experimental method on hydraulic fracturing of coal-bed reservoir[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2011, 3: 422-428.
- [3] Zhai C, Li M, Sun C, et al. Guiding-controlling technology of coal seam hydraulic fracturing fractures extension[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(6): 831-836.
- [4] 董光, 邓金根, 朱海燕, 等. 煤层水力压裂裂缝导流能力实验评价[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(8): 2049-2052.
Dong Guang, Deng Jingen, Zhu Haiyan, et al. Experimental evaluation on conductivity of hydraulic fracture in CBM wells[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(8): 2049-2052.
- [5] Settari A, Cleary M P. Three dimensional simulation of hydraulic fracturing[J]. Journal of Petroleum Technology, 1984, 36: 1170-1190.
- [6] Aghighi M A, Rahman S S. Initiation of a secondary hydraulic fracture and its interaction with the primary fracture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(5): 714-722.
- [7] Dawson G K W, Esterle J S. Controls on coal cleat spacing[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 82: 213-218.
- [8] Medhurst T P, Brown E T. A study of the mechanical behavior of coal for pillar design[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(8): 1087-1104.
- [9] Huang B, Liu J. The effect of loading rate on the behavior of samples composed of coal and rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 61: 23-30.
- [10] 单学军, 张士诚, 李安启, 等. 煤层气井压裂裂缝扩展规律分析[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 130-132.
Shan Xuejun, Zhang Shicheng, Li Anqi, et al. Analyzing the fracture extended law of hydraulic fracturing in coal-bed gas wells[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 130-132.
- [11] 吴晓东, 席长丰, 王国强. 煤层气井复杂水力压裂裂缝模型研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 124-126.
Wu Xiaodong, Xi Changfeng, Wang Guoqiang. The mathematic model research of complicated fractures system in coalbed methane well[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(12): 124-126.
- [12] 杜春志, 茅献彪, 卜万奎. 水力压裂时煤层裂缝的扩展分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(2): 231-234.
Du Chunzhi, Mao Xianbiao, Bu Wankui. Analysis of fracture propagation in coal seams during hydraulic fracturing[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(2): 231-234.
- [13] 唐书恒, 朱宝存, 颜志丰. 地应力对煤层气井水力压裂裂缝发育的影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 65-69.
Tang Shuheng, Zhu Baocun, Yan Zhifeng. Effect of crustal stress on hydraulic fracturing in coalbed methane wells[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 65-69.

(责任编辑 赵业玲)

·学术动态·



中国科协第92期“新观点新学说学术沙龙”聚焦 “大数据时代的隐私保护”

2014年10月19—20日,主题为“大数据时代隐私保护的挑战与思考”的中国科协第92期“新观点新学说学术沙龙”在贵阳召开。北京信息科学技术研究院研究员冯登国、杭州师范大学教授陈克非、中国科学院软件研究所研究员张振峰担任领衔专家,邀请了34位相关专家与会研讨,80余名代表旁听沙龙讨论。

在2天的沙龙活动中,安排了28个主题发言,内容涉及大数据对网络安全带来的挑战、适用于大数据安全的密码学技术、大数据的隐私保护关键技术、大数据应用中的安全和隐私问题等。通过报告和讨论,总结和梳理了大数据时代的信息安全与隐私保护问题,分析和研讨了大数据时代隐私保护发展前景及存在的问题。与会专家一致认为,大数据时代对隐私保护问题提出了前所未有的挑战,需要大力加强大数据安全技术的研究和应用,为敏感信息的传输、存储、发布和使用保驾护航。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35533/n38560/16051826.html>。