

文章编号:1673-5005(2007)06-0048-03

水力射孔参数对起裂压力影响的实验研究

黄中伟^{1,2}, 李根生²

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中国石油大学 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249)

摘要:采用真三轴实验架,对岩样施加三轴应力,通过改变岩样中的射孔深度、射孔直径、射孔轴线和最大水平应力之间的夹角 α 等参数,考察了不同射孔参数条件下的起裂压力变化规律。结果表明,起裂压力随射孔深度和直径的增加而降低,随夹角 α 的增加而增加。实验结果可为水力射孔及压裂的现场施工提供参考。

关键词:水射流;射孔;压裂;实验研究

中图分类号:TE 357.1

文献标识码:A

Experimental study on effects of hydrau-perforation parameters on initial fracturing pressure

HUANG Zhong-wei^{1,2}, LI Gen-sheng²

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;

2. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: By using the real triaxial stress frame, the initial pressure changing laws were tested through exerting triaxial stress on the cement samples under different perforation parameters including perforation depth, perforation diameter and the angle of α between the hole axis and the maximum horizontal in-situ stress. The results show that the initial pressure decreases with the perforation depth and diameter increasing, while increases with the angle of α increasing. The conclusions can provide references for the field performance of hydrau-perforating and fracturing.

Key words: water jet; perforation; fracturing; experimental study

水力压裂是一个十分复杂的物理过程。由于水力压裂所产生的裂缝实际形态难于直接观察,研究者只能借助于建立在某种假设和简化条件基础上的数值模型进行间接分析^[1-7],但裂缝扩展模拟模型所需参数较多且参数值的获得难度较大,这在很大程度上限制了模型的应用。许多学者对水力压裂作业后裂缝的连通情况、射孔参数对裂缝参数及压裂效果的影响进行了实验研究^[8-15]。笔者针对水力射孔的技术特点^[16],即孔眼深度和直径较大、没有压实带的影响等,利用室内真三维压裂模拟实验架,制作大尺寸(300 mm × 300 mm × 300 mm)岩样,探索射孔参数(孔深、孔径、孔眼和最大水平应力夹角)对水力射孔起裂压力的影响规律。

1 实验

1.1 实验装置

实验装置为中国石油大学(北京)岩石力学实验室人员设计组建的一套大尺寸真三轴模拟实验系统,该系统由大尺寸真三轴实验架、MTS 伺服增压泵、数据采集系统、稳压源、油水隔离器及其他辅助装置组成,其整体结构如图 1 所示。

采用扁千斤顶向试样的侧面和顶面施加刚性载荷(图 2),根据水力压裂的特点,在其中的一个水平方向上采用 3 对扁千斤顶分别模拟产层和上、下隔层的地应力,在其他两个方向各放置一对扁千斤顶以模拟垂向地应力和最大水平地应力。由多通道稳

收稿日期:2007-06-30

基金项目:国家自然科学基金项目(50774089)和国家“863”计划课题(2006AA06A106)

作者简介:黄中伟(1972-),男(汉族),山东东明人,讲师,博士研究生,主要从事高压水射流在石油工程中的应用研究。

压源向扁千斤顶提供液压,各通道的压力可控(每个通道的最大供液压力可达 60 MPa)。利用真三轴

加载方式人为地控制裂缝延伸方向,使实验试件受力尽可能地接近实际岩层的受力状况。

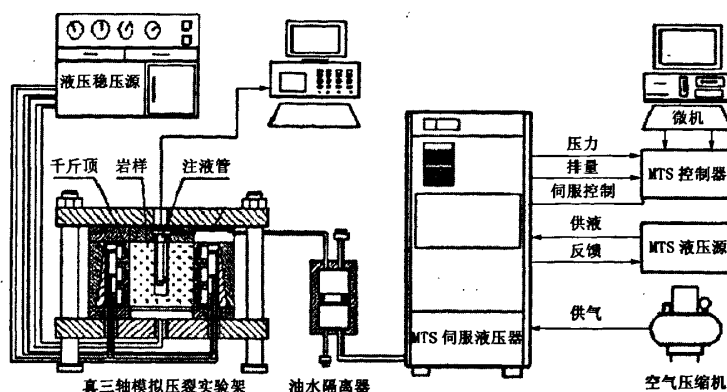


图1 水力压裂模拟实验装置示意图

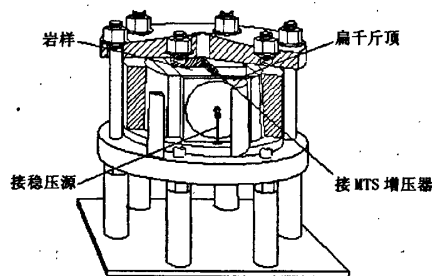


图2 真三轴模拟实验架的结构示意图

在模拟压裂实验系统中采用 MTS 伺服增压泵和油水分离器向模拟井眼泵注高压液体。MTS 增压泵具有程序控制器,既能以恒定的排量泵注液体,也能按预先设定的泵注程序进行。实验过程中利用 MTS 数据采集系统记录压裂液压力、排量等参数。MTS 增压泵的工作介质是液压油,因此当使用水或其他介质作为压裂液时,在管路上设置一个油水分离器,将 MTS 的工作介质与压裂液分隔开。实验中将一台滑套式油水分离器放置在厚壁圆柱形高压釜中,设置一隔离滑套,将其两侧的油、水分隔开。

采用瓜胶溶液作为压裂液,其流性指数为 0.37,稠度系数为 $19.8 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$ 。为了更清晰地示踪裂缝的最终形态,压裂液中混入红色染料;压裂完毕后,将试件取下,沿压裂裂缝将水泥块剖开,观察裂缝的形态。

1.2 岩样制备

室内水力压裂实验可采用天然岩样或人工岩样进行,鉴于天然岩样来源与加工条件所限,本实验中采用了混凝土试样。由于真三轴实验架采用刚性压力板向试样施加压力,对试样端面的平行度要求较高,其不平行度一般小于 0.01 mm。采用专用模具

来制作。在水泥中加入一定比例的石英砂浇筑成水泥试样。在浇筑试样的同时将模拟井筒和模拟射孔预置在试样中。

试样尺寸为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$;试样材料为水泥 + 细河砂(体积比1:1);模拟井筒尺寸为 $\Phi 20 \text{ mm} \times 170 \text{ mm}$;模拟井筒内径为 $\Phi 8 \text{ mm}$;井筒壁面模拟射孔直径为 5 mm;模拟射孔数为 2;模拟射孔位置在试样中心;施加在岩样上的水平方向应力分别为 12, 15 MPa,垂直方向应力为 21 MPa。

1.3 实验流程

将试样放入压机,然后安装压力板和压机的其他部件。为了保证压力板向试样表面的均匀加载,在压力板与试样之间放置一橡胶垫片。试样安装完毕后,由液压稳压源施加三向围压;再根据选定的泵排量向模拟井筒泵注压裂液,直到试样破裂。试样破裂后,观察形成的裂缝形态即裂缝表面压裂液的痕迹,并通过 MTS 实验机记录裂缝扩展过程中泵注压力和排量等参数。

2 实验结果分析

实验中改变模拟射孔的射孔直径、射孔深度、射孔轴线和最大水平应力之间的夹角,测试分析试样的起裂压力变化规律。

实验结果处理中,加载曲线(压力-时间曲线)由微机自动记录,岩样起裂压力为加载过程中液压稳压源压力突然下降的压力点。

2.1 射孔直径的影响

为便于比较,岩样中射孔深度统一设定为 50 mm。图3为起裂压力随射孔直径的变化曲线。从图中可以看出,随着孔眼直径的增加,岩石起裂压力

开始下降较快,当射孔直径超过4 mm后,这一趋势逐渐变缓,直径由4 mm增加到8 mm后,起裂压力仅下降了0.69 MPa(2.7%),说明岩样的起裂压力对射孔直径变化并不敏感。

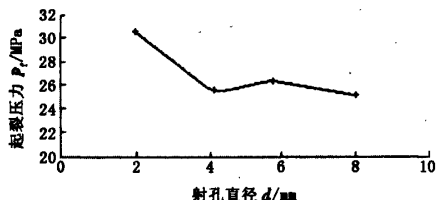


图3 起裂压力和射孔直径的关系曲线

2.2 射孔深度的影响

岩样射孔直径为4 mm条件下起裂压力随射孔深度的变化曲线见图4。从图中可以看出,随着射孔深度的增加,岩样的起裂压力呈近似线性降低,当射孔深度由30 mm增大到50 mm时,深度增加了66.7%,起裂压力则由29.21 MPa降低到了25.77 MPa,下降了11.8%。

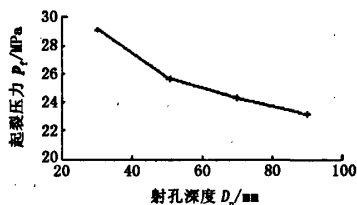


图4 起裂压力和射孔深度的关系曲线

2.3 孔眼轴线与最大水平应力夹角的影响

岩样在射孔处的横切面俯视图如图5所示。孔

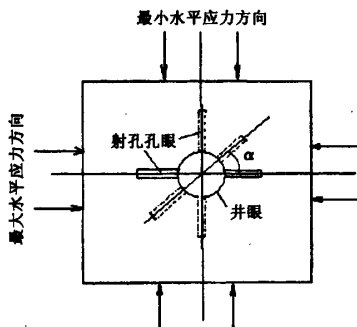


图5 岩样横切面俯视图

眼直径和深度分别为4 mm和50 mm条件下起裂压力随射孔孔眼轴线与最大水平主应力夹角 α 的变化曲线见图6。从图中可以明显地看出,沿着最大水平主应力射孔($\alpha = 0^\circ$)时起裂压力最小,随着射孔轴线与最大水平应力夹角 α 的增加,岩样起裂压力几乎呈线性上升,夹角平均每增加 10° ,起裂压力就增加0.7 MPa左右, $\alpha = 90^\circ$ 时起裂压力达到极大

值。这说明实验中岩样破坏符合最小能量原理,即岩体动力破坏总是沿着能量消耗最小的方向展开。

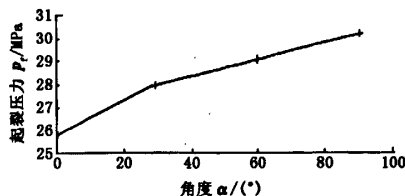


图6 起裂压力和夹角 α 的关系曲线

3 结论与建议

(1)现场压裂施工时,为降低地层起裂压力及对地面设备的性能要求,应增加射孔深度和直径,并尽可能沿最大水平主应力方向射孔。

(2)由于实验条件的限制,本文中的实验只采用了一种规格尺寸的岩样,建议以后增加岩样尺寸重复实验。同时,鉴于实验的难度,建议采用有限元法进行三维数值模拟实验,以便验证实验结果的可重复性和正确性,减少实验工作量。

参考文献:

- [1] 温庆志, 张士诚. 改进的水平缝四点井网整体压裂数值模拟[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2005, 29(6): 57-60.
WEN Qing-zhi, ZHANG Shi-cheng. Improved integral fracturing numerical simulation for four-spot pattern with horizontal fractures [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005, 29(6): 57-60.
- [2] 黄中伟, 李根生, 牛继磊, 等. 水力射孔参数对油水井压裂影响的数值试验[J]. 石油机械, 2006, 34(2): 1-3.
HUANG Zhong-wei, LI Gen-sheng, NIU Ji-lei, et al. Numerical test to the influence of hydraulic perforation parameter on fracture in oil and water wells [J]. China Petroleum Machinery, 2006, 34(2): 1-3.
- [3] 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): 41-44.
ZHANG Guang-qing, CHEN Mian, YIN You-quan, et al. Study on influence of perforation on formation fracturing pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 41-44.
- [4] 胡永全, 赵金洲, 曾庆坤, 等. 计算射孔井水力压裂破裂压力的有限元方法[J]. 天然气工业, 2003, 23(2): 57-59.
HU Yong-quan, ZHAO Jin-zhou, ZENG Qing-kun, et al. Finite element method to calculate fracture pressure of perforated well hydrofrac [J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(2): 57-59.

(下转第54页)

- LI You-chen, WU Xu-hui, ZHANFG Xuan. The study on front fluid technology[J]. West-China Exploration Engineering, 2005,17(sup):128-129.
- [6] 李早元,杨绪华,郭小阳,等. 固井前钻井液地面调整及前置液紊流低返速顶替固井技术[J]. 天然气工业, 2004,21(4):31-33.
- LI Zao-yuan, YANG Xu-hua, GUO Xiao-yang, et al. Cementing techniques of ground adjusting drilling fluid properties before cementing and displacing mud by turbulent pre-flush at low return velocity[J]. Natural Gas Industry, 2004,21(4):31-33.
- [7] 刘东清,周仕明. SMS 抗盐高效前置液的研制与应用[J]. 石油钻探技术,1999,27(5):44-46.
- LIU Dong-qing, ZHOU Shi-ming. Study and application of SMS high efficiency salt-resisting pad fluid[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1999,27(5):44-46.
- [8] 何育荣,王瑞和,邱正松,等. 高渗透水泥浆高温高压流变性研究[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2005, 29(3):57-60.
- HE Yu-rong, WANG Rui-he, QIU Zheng-song, et al. Study on rheological property of high permeable cement slurry under high temperature and high pressure[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005,29(3):57-60.
- [9] 高永海,孙宝江,刘东清,等. 环空水泥浆顶替界面稳定性数值模拟研究[J]. 石油学报,2005,26(5):119-122.
- GAO Yong-hai, SUN Bao-jiang, LIU Dong-qing, et al. Numerical simulation on stability of cement displacement interface in annulus[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005,26(5):119-122.
- [10] TEHRANLI A, FERGUSON J, BITTLESTON S H. Laminar displacement in annuli: a combined experimental and theoretical study[R]. SPE 24569, 1992.
- [11] OZBAYOGLU E M, OMURLU C. Analysis of the effect of eccentricity on the flow characteristics of annular flow of non-Newtonian fluids using finite-element method [R]. SPE 100147, 2006.
- (编辑 李志芬)
-
- (上接第50页)
- [5] 冷雪峰,唐春安,李连崇,等. 非均匀孔隙压力下水压致裂的数值试验[J]. 东北大学学报,2003,24(3):288-291.
- LENG Xue-feng, TANG Chun-an, LI Lian-chong, et al. Numerical simulation of hydrofracturing in anisotropic pore pressure fields[J]. Journal of Northeastern University, 2003,24(3):288-291.
- [6] YAMAMOTO K, SHIMAMOTO T. Verification of a 3D hydraulic fracturing model against a field case[R]. SPE 59373, 2000.
- [7] ROMERO Jean, MACK M G, EIBEL J L. Theoretical model and numerical investigation of near-wellbore effects in hydraulic fracturing[J]. SPE Prod & Facilities, 2000,15(2):76-82.
- [8] HALLAM S D, LAST N C. Geometry of hydraulic fractures from modestly deviated wellbores[R]. SPE 20656, 1991.
- [9] van de KETTERIJ R G, de PATER C J. Experimental study on the impact of perforation on hydraulic fracture tortuosity[R]. SPE 38149, 1997.
- [10] ABASS H H, HEDAYATI Saeed, MEADOWS D L. Nonplanar fracture propagation from a horizontal wellbore: experimental study[R]. SPE 24823, 1992.
- [11] BEHRMANN L A, EIBEL J L. Effect of perforation on fracture initiation[R]. SPE 20661, 1991.
- [12] CROSBY D G, RAHMAN M M, RAHMAN M K, et al. Single and multiple transverse fracture initiation from horizontal wells[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2002,35:191-204.
- [13] EI Rabaa W. Experimental study of hydraulic fracture geometry initiated from horizontal well[R]. SPE 19720, 1989.
- [14] 耿宇迪. 层状介质水力裂缝垂向扩展规律的物理模拟研究[D]. 北京:石油大学石油天然气工程学院, 2004.
- [15] 赵益忠,曲连忠,王幸尊,等. 不同岩性地层水力压裂裂缝扩展规律的模拟实验[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2007,31(3):63-66.
- ZHAO Yi-zhong, QU Lian-zhong, WANG Xing-zun, et al. Simulation experiment on prolongation law of hydraulic fracture for different lithologic formations[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007,31(3):63-66.
- [16] 李根生,熊伟,宋剑,等. 高压水射流深穿透射孔产能影响因素[J]. 石油钻采工艺,2006,28(4):60-63.
- LI Gen-sheng, XIONG Wei, SONG Jian, et al. Influencing factors to productivity for high pressure water jet perforation[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006,28(4):60-63.
- (编辑 李志芬)