

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1345

一种用于水压致裂试验的水压供给装置研制及应用

张 波¹, 李 垚¹, 杨学英², 朱飘扬¹, 朱春帝¹, 刘子豪¹, 刘文杰¹, 罗志恒¹

(1. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061; 2. 山东城市建设职业学院, 山东 济南 250014)

摘 要: 为研究水压致裂过程中水力裂缝的起裂、扩展规律及机制, 研制了一种新型水压供给控制装置。该装置由水泵、增压泵、空气压缩机和导水钢垫板等组成。该装置的主要特点是易于与目前广泛存在的压力伺服机相配合, 共同完成水压致裂试验, 具有操作简便、效率高、成本低、组装方便等优点, 使水压致裂试验更易大面积推广。利用该试验装置对类岩石试块进行了水压致裂试验, 研究了不同围压下含预置裂隙试件的水力裂缝扩展规律, 并与无预置裂隙试件水力裂缝扩展规律进行了对比。试验结果表明, 对于含预置裂隙试块, 当水平应力差较小时, 预置裂隙裂尖对水力裂缝扩展影响较大, 水力裂缝起裂后向预置裂隙裂尖方向扩展; 随着水平应力差的增大, 水力裂缝向最大水平应力方向偏转。试验证明该装置可靠性高, 试验过程稳定。该研究对水压致裂试验具有促进意义。

关 键 词: 水压致裂; 水压供给装置; 裂纹扩展方向; 预置裂隙; 水平应力差

中图分类号: TD 315

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 05-2022-07

Design and application of a hydraulic pressure supply device for hydraulic fracturing experiments

ZHANG Bo¹, LI Yao¹, YANG Xue-ying², ZHU Piao-yang¹, ZHU Chun-di¹,
LIU Zi-hao¹, LIU Wen-jie¹, LUO Zhi-heng¹

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China;

2. Shandong Urban Construction Vocational College, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: To investigate the initiation and propagation of hydraulic fracturing, a new type of hydraulic pressure supplying and controlling device and its operational approach are developed. The device consists of water pump, booster pump, air compressor, water guiding steel subplate and other components. This device is prone to combine with the pressure servo machine to complete the hydraulic fracturing experiment. It has the advantages of simple operation, high efficiency, low cost, and easy assembly, which makes the hydraulic fracturing experiment easier to be popularized in a wide range. The hydraulic fracturing test of rock-like specimens are carried out by using this test device. Hydraulic fracture propagation of specimens with pre-existing flaws under different confining pressures are studied and compared with that of specimens without pre-existing flaws. The experimental results show that when the horizontal stress difference is low, the pre-existing flaw tip exposes great influence on hydraulic fracture propagation, and the hydraulic fracture propagates towards it. With increasing the horizontal stress difference, the hydraulic fracture deflects towards the direction of the maximum horizontal stress. The experiment shows that the device developed in this research has high reliability and stability. This study has a promoting significance for the hydraulic fracturing test.

Keywords: hydraulic fracturing; water pressure supply device; fracture propagation direction; pre-existing flaw; horizontal stress difference

1 引 言

水压致裂是将高压流体注入目标岩层, 利用流体的传压特性产生沿着一定方向扩展的裂隙。水压

致裂方法起源于美国, 是石油和天然气增产的一种方式^[1], 而后 Lockner 等^[2]基于弹性力学和断裂力学理论提出了岩石材料的水压致裂机制。目前水压致裂方法广泛应用于石油工业、地质工程等多个领域,

收稿日期: 2018-07-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No.51879151, No. 51879148), 国家自然科学基金委联合基金(No. U1806226)。

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (51879151, 51879148) and the Joint Fund of National Natural Science Foundation of China (U1806226).

第一作者简介: 张波, 男, 1977 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土体破坏及加固机理研究。E-mail: zhangbo1977@sdu.edu.cn

对油、气田的勘测和开发利用以及地应力的测量具有十分重要的作用和意义^[3-9]。在水压致裂的研究和使用过程中,室内模拟试验是一种重要的研究手段,利用室内模拟试验可以方便地观测裂缝起裂位置、扩展方向等,可为实际水压致裂工程提供技术保障及理论支持。

目前已有多种水压致裂室内试验装置被应用于相关研究,吴景浓等^[10]研制了具有孔隙水压、围压和轴向压力三种独立加荷系统的水压致裂设备,采用控制变量的试验方法得到了试块强度和变形特征与应力途径之间的关系。Reinicke 等^[11]利用高精密度压力传感器对致密砂岩进行了水压致裂试验,得到了水压致裂作用下致密砂岩水力裂缝的扩展规律。简浩等^[12]设计研制了水压致裂试验中的专用注水加载装置,成功观察了裂纹扩展的全过程,提出了损伤和劈裂门槛值的概念。Tan 等^[13]设计了一套水压致裂物理模拟试验装置,对天然煤和页岩试件进行了水压致裂试验,给出了要尽量避免在断层附近设置钻进井筒的工程建议。刘元坤等^[14]设计了一种新型水压劈裂测试设备,并研发了与之相匹配的测试软件,在实际运用中取得了良好的效果。詹美礼等^[15]使用“超高压(多路控制)大流量渗透仪及渗流应力耦合系统”,对厚壁圆筒试件进行了水力劈裂试验,提出了水力劈裂问题中渗透力的作用机制和水力劈裂破坏的半经验理论判别。Bohlooli 等^[16]利用双轴试验装置进行了水压致裂试验,得到了围压对水力裂隙扩展的影响规律。周长冰等^[17]利用“伺服控制高温高压岩体三轴试验机”对花岗岩试样在高温条件下进行了水压致裂试验,揭示了水压致裂过程中温度对花岗岩裂纹起裂和扩展的影响规律。梁超等^[18]针对使用传统水压致裂法测试地应力的设备准确率和效率低的不足,提出了优化改进方法,将两套装置结合使其更加适用于煤矿的深部作业。姚飞等^[19]使用大尺寸真三轴模拟系统对水压致裂过程进行了试验模拟,研究了水力裂缝和天然裂隙之间的关系。侯振坤等^[20]使用真三轴试验机水力压裂伺服系统和声发射定位系统进行了水压致裂试验,对水力裂缝扩展规律进行了研究,为页岩气开采提供了技术保障。陈江湛等^[21]利用三轴加载试验系统对煤岩进行了脉冲水压致裂试验,分析了水力裂缝的扩展过程,得到了水力裂缝的扩展规律。

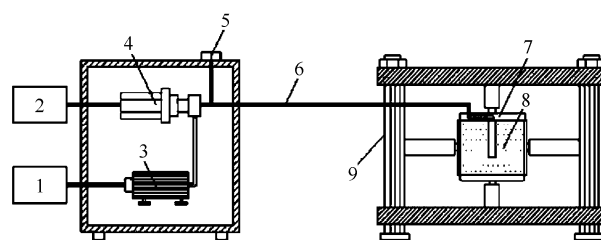
上述水压致裂试验系统是目前常用的水压致裂设备,其优点是易于实现三轴围压下的水压致裂试验,同时也存在设备复杂、制造成本高等不足之处。针对以往装置的不足,本文设计了一种易于与压力

伺服试验机相配合共同完成水压致裂试验的设备与方法,该设备操控简单、占用空间较小且易于实现单轴、双轴及三轴围压下的水压致裂试验。该水压供给装置可以与目前国内高校及科研机构中大量存在的压力试验机相互配合完成水压致裂试验,使水压致裂试验的大面积推广成为可能。利用此装置进行了室内水压致裂试验,取得了良好的试验效果。

2 水压供给控制装置的研制

2.1 水压供给控制装置设计

本文提出的水压供给控制装置由水箱、水泵、增压泵、空气压缩机和导水钢垫板等组成,如图1所示。水泵提供压裂液(本研究以水为压裂液),空气压缩机导入增压泵另一入口,以提供高压空气,高压空气进入增压泵对水进行加压,高压管路将增压后的高压水通过导水钢垫板输送至试验块体内部。



1—水箱 2—空气压缩机 3—水泵 4—增压泵 5—智能仪表
6—高压导管 7—导水钢垫板 8—岩样 9—压力机

(a) 水压供给控制装置设计示意图



(b) 水压供给控制装置实物图

图1 水压供给控制试验装置

Fig.1 Hydraulic pressure supply control experimental device

本文设计的导水钢垫板具有较大创新性。且可拆卸功能的导水钢垫板与试验试块的横截面积相同,保证了整个试验过程的密闭性。导水钢垫板内的导水通道设有弯折,入口端偏离导水钢垫板中心位置处以便于压力机加载竖向压力,出口端位于导水钢垫板的中心位置以便于将高压水导入试件内部,如图2所示。导水钢垫板成功实现了水压与围压的同步耦合加载。

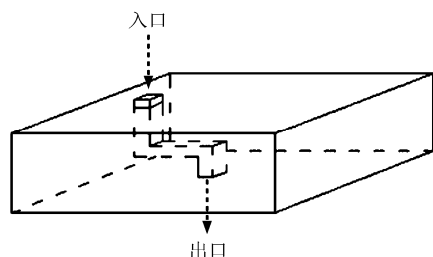


图2 导水钢垫板及其内部的导水通道

Fig.2 Water guide plate and its internal water channel

2.2 水压供给控制装置的操作步骤

水压供给控制装置的主要操作步骤如下：首先将装置的各部分紧密连接；然后将导水钢垫板置于试块与压力机的加载端头之间；而后启动空气压缩机，为增压泵提供初始的气体压力；最后启动增压泵和水泵，高压液体的压力大小通过智能仪表显示，增压泵将增压后的高压液体通过高压导管传送至试块内部，从而实现高压液体对试块的加压致裂。图3为水压致裂试验的围压加载装置——三轴伺服压力试验机。



图3 水压致裂试验围压加载装置

Fig.3 Confining pressure loading device for hydraulic fracturing experiment

2.3 水压供给控制装置的技术优势

本装置试验全过程操作简单、效率高，最大的优势在于易于与既有的压力伺服试验机组合完成水压致裂试验，降低了设备成本，具备大面积推广的客观条件。其中的导水钢垫板既能承受压力机的高压，又能保证高压液体持续进入试块内部。

3 水压致裂试验

3.1 试验准备

利用研发的水压供给装置配合三轴试验机对类岩石材料试块进行了水压致裂试验。试验采用的类岩石材料试块使用水泥砂浆制作而成，原料为粒径小于 1.25 mm 的干砂、325#水泥和水，三者之间的质量比为 3.5:1:0.65。将 3 种原料按照比例放入搅拌机中充分搅拌，然后将水泥砂浆倒入立方体模具中，将模具放于平板振动台上振动 15 min。

为了与含预置裂隙试件水力裂缝扩展规律进行对比，本次试验试块分为两大类，一类试块中不含预置裂隙，另一类试块中含预置裂隙。不含预置裂隙的试块制作过程为：将混合好的水泥砂浆倒入立方体模具中放于平板振动台上振动 15 min，制作完成 12 h 后拆模放入养护箱中养护。含预置裂隙的试块制作过程为：模具在倒入水泥砂浆前先将用于模拟天然裂隙的纸片用穿线法固定在设计位置，以保证裂隙角度符合试验要求，如图 4 所示。试块制作完成 12 h 后拆模，并将拆模后的试块放入养护箱中养护。本试验的养护条件为：相对湿度大于 95%，温度为 20 ± 1.5 °C，养护时间为 28 d。

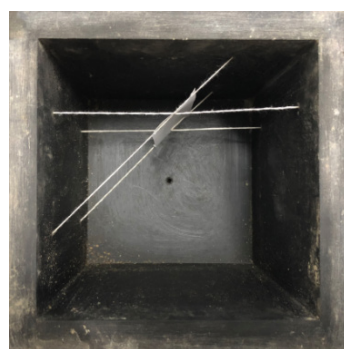


图4 内含预置纸片的立方体模具

Fig.4 Cube mold with preset sheet

立方体试块尺寸为：150 mm×150 mm×150 mm，模拟天然裂隙的矩形纸片尺寸为：90 mm×40 mm×0.5 mm，试块养护完成后，在其上表面正中央位置打入直径为 12 mm、深为 75 mm 的圆孔，在孔中固定一根长度为 65 mm、直径为 10 mm、壁厚为 1 mm 的钢管，以模拟真实水压致裂工程中的井管，预留 10 mm 部分作为裸孔段，高压水进入试块内部后水力裂缝在裸孔段部分起裂并扩展，两类试块的示意图如图 5 所示，在本试验中 $\alpha = 45^\circ$ （ α 为模拟天然裂隙的纸片与水平方向的夹角），图 5 中 σ_H 为水平面内最大应力值， σ_h 为水平面内最小应力值， σ_z 为竖直方向应力值。

在模拟的井口位置周围均匀涂抹一层厚度为 1 mm 的结构胶，待其完全凝固后在表面以万能胶水固定两个 O 型圈，外层 O 型圈尺寸如下：外径为 19 mm，内径为 17 mm；内层 O 型圈尺寸如下：外径为 10 mm，内径为 8 mm；O 型圈厚度为 1 mm。导水钢垫板的出水口设有直径为 20 mm，深度为 1 mm 的 O 型凹槽，其与 O 型圈组合，在竖直方向应力 σ_z 的作用下保证了试验过程的水密封性，如图 6 所示。

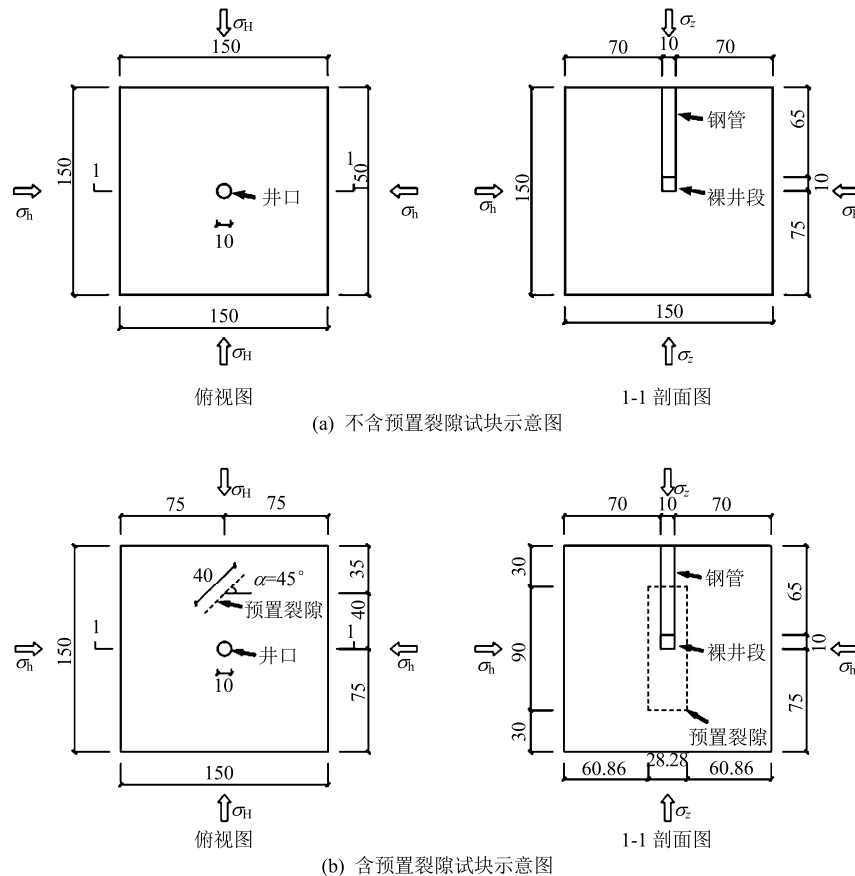


图 5 类岩石材料试块示意图 (单位: mm)

Fig.5 Schematic of rock-like material specimens (unit: mm)

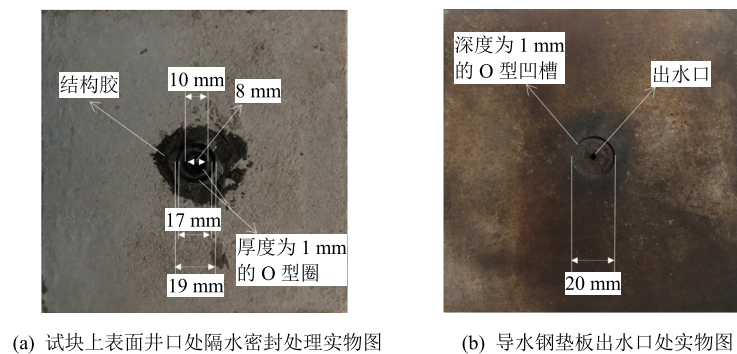


图 6 井口水密封处理实物图

Fig.6 Water sealing at wellbore entrance

在不同水平应力差下对试块进行水压致裂试验, 本次试验共分 7 组, 以往学者研究中水平应力之比 $\sigma_H : \sigma_h$ 多数在 1.0~2.0 之间^[22-24], 即水平应力差系数 K_h ^[25] 的数值在 0~1 之间, 水平应力差系数 $K_h = (\sigma_H - \sigma_h) / \sigma_h$ 。本文为了研究水平应力差系数 K_h 的影响, 又增加了 K_h 为 2 和 3 的工况, 因此在制定试验方案时将含预置裂隙试块水平应力差系数 K_h 定为 0、1、2、3。为了与含预置裂隙试块水力裂缝扩展规律进行对比, 本文也进行了不含预置裂隙试块水压致裂试验。以往学者的研究发现, 在无

预置裂隙试块中水平应力差系数 $K_h = 0$ 时, 水力裂缝的起裂角度和扩展方向存在较大的随机性^[26-27], 因此对无预置裂隙试块, 本试验中只对水平应力差系数 K_h 分别为 1、2、3 的情况进行了研究。试验工况及参数如表 1 所示。试验中的试块单轴抗压强度为 23.93 MPa。试验过程中, 为消除结果的离散性, 每组工况制作 3 块同样试块, 若同一工况中至少有 2 块以上具有相同的水力裂缝扩展模式, 则该扩展模式确认为该工况的水力裂缝扩展, 若上述条件不满足, 则重新制作该组 3 块试块养护后, 再进行水

压致裂试验。

表 1 试验工况

Table 1 Experimental conditions

试块 类型	工况	水平应力	围压数值		竖直方向
		差系数	/ MPa		应力值 σ_v / MPa
			K_h	σ_h	
不含预置 裂隙	A	1	1.335 0	2.67	3.56
	B	2	0.890 0	2.67	3.56
	C	3	0.667 5	2.67	3.56
	D	0	2.670 0	2.67	3.56
含预置 裂隙	E	1	1.335 0	2.67	3.56
	F	2	0.890 0	2.67	3.56
	G	3	0.667 5	2.67	3.56

3.2 试验结果

不含预置裂隙的试块, 水力裂缝扩展见如图 7、8 所示。通过水压致裂试验结果可以看出, 不含预置裂隙的试块, 水力裂缝的起裂与扩展方向与水平最大应力 σ_H 方向接近。

含预置裂隙的试块, 水力裂缝扩展见如图 9、10 所示。通过水压致裂试验结果可以看出, 含预置裂隙的试块, 当水平应力差系数较小时 ($K_h = 0, 1$), 预置裂隙裂尖对水力裂缝扩展影响较大, 水力裂缝起裂后向预置裂隙裂尖方向扩展; 随着水平应力差系数的增大 ($K_h = 2, 3$), 水力裂缝扩展方向向水平最大应力方向偏转, 如图 9、10 所示。

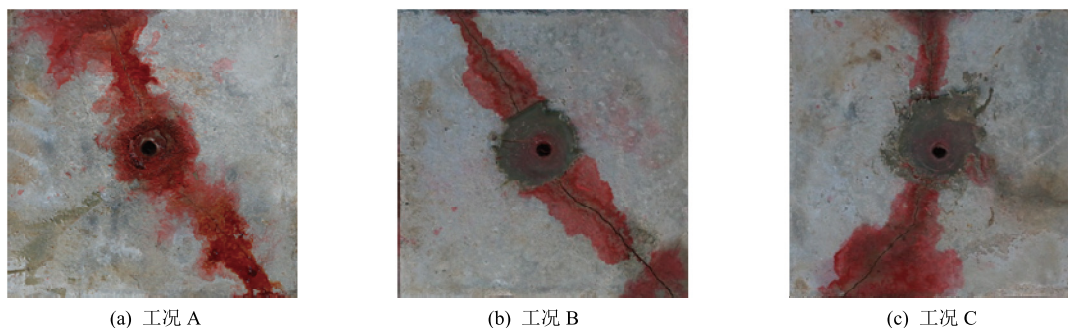


图 7 不含预置裂隙试块水力裂缝扩展试验结果

Fig.7 Experimental results of hydraulic fracture propagation of specimens without preexisting flaws

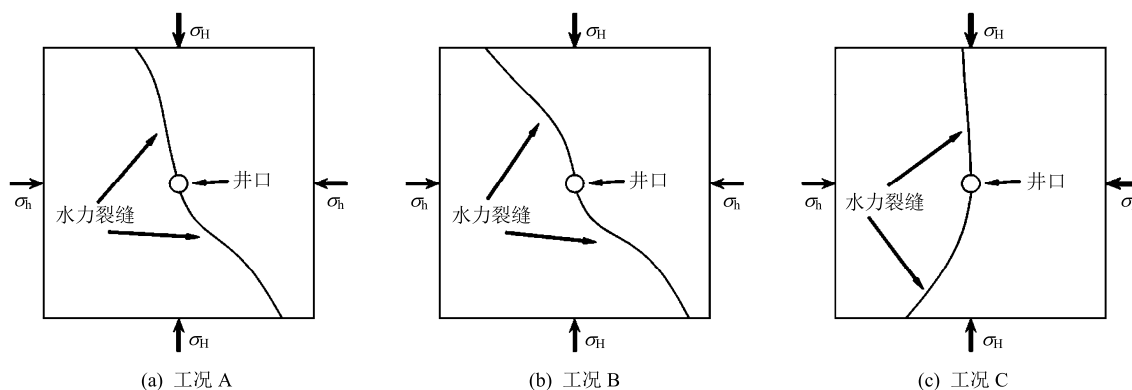


图 8 不含预置裂隙试块水力裂缝扩展示意图

Fig.8 Schematic diagrams of hydraulic fracture propagation of specimens without pre-existing flaws

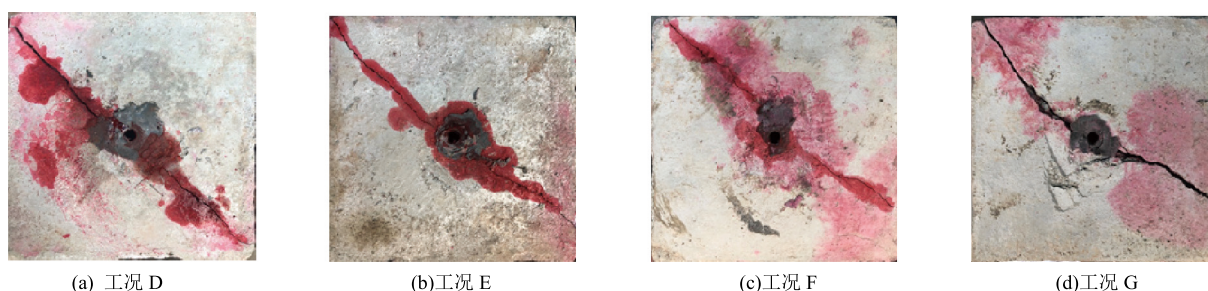


图 9 含预置裂隙试块水力裂缝扩展试验结果

Fig.9 Experimental results of hydraulic fracture propagation of specimens with pre-existing flaws

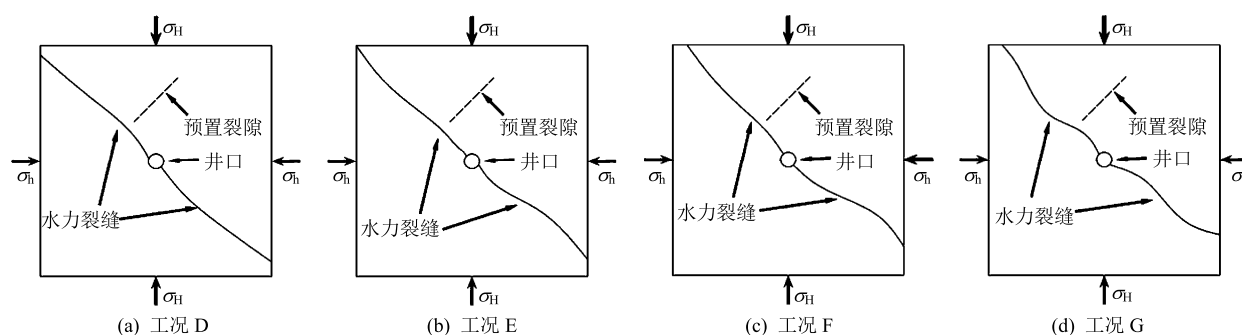


图 10 含预置裂隙试块水力裂缝扩展示意图

Fig.10 Schematic diagrams of hydraulic crack propagation of specimens with pre-existing flaws

各工况最大水压值见表 2。根据表 2 可知，水压最大值随着水平应力差系数 K_h 的增大而减小。

表 2 最大水压值
Table 2 Maximum water pressure

工况	A	B	C	D	E	F	G
水压力最大值/MPa	11.7	11.2	11.0	10.8	9.8	9.2	8.9

4 结 论

(1) 研制了一种用于水压致裂试验的水压供给控制装置及其试验方法，具有操作简便、效率高、成本低等优点。

(2) 导水垫板的设计实现了水压与围压的同步耦合加载。

(3) 当水平应力差较小时，预置裂隙裂尖对水力裂缝扩展影响较大，水力裂缝起裂后向预置裂隙裂尖方向扩展。

(4) 随水平应力差的增大，水力裂缝向水平最大应力方向偏转。

(5) 随水平应力差的增大，最大水压力值减小。

参 考 文 献

- [1] 李宏, 张伯崇. 水压致裂试验过程中自然电位测量研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1425—1429.
LI Hong, ZHANG Bo-chong, Study on spontaneous potential measurement during hydraulic fracturing experiment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(7): 1425—1429.
- [2] LOCKNER D, BYERLEE J D. Hydro-fracture in Weber sandstone at high confining pressure and differential stress[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(14): 2018—2026.
- [3] 丁健民, 梁国平. 唐山、天津和沧州地区的油井水力压裂应力测量[J]. 地震学报, 1985, 7(4): 363—373.
DING Jian-min, LIANG Guo-ping. Stress measurement by hydraulic fracturing in oil-wells of north China[J].

Acta Seismologica Sinica, 1985, 7(4): 363—373.

- [4] 刘允芳. 水压致裂法三维地应力测量[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(3): 246—256.
LIU Yun-fang. In-situ 3-dimensional stress measurements by hydraulic fracturing technique[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1991, 10(3): 246—256.
- [5] 刘跃东, 林健, 冯彦军, 等. 基于水压致裂法的岩石抗拉强度研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1781—1788.
LIU Yue-dong, LIN Jian, FENG Yan-jun, et al. Research on tensile strength of rock based on hydraulic fracturing method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(5): 1781—1788.
- [6] 李连崇, 杨天鸿, 唐春安, 等. 岩石水压致裂过程的耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1060—1066.
LI Lian-chong, YANG Tian-hong, TANG Chun-an, et al. Coupling analysis on hydraulic fracturing process of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(7): 1060—1066.
- [7] YANG T H, THAM L G, TANG C A. Influence of heterogeneity of mechanical properties on hydraulic fracturing in permeable rocks[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2004, 37(4): 251—275.
- [8] 杜春志. 煤层水压致裂理论及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
DU Chun-zhi. Study on theoretics of hydraulic fracturing in coal bed and its applications[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.
- [9] 欧阳振华, 齐庆新, 张寅, 等. 水压致裂预防冲击地压的机理与试验[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增刊 2): 321—325.
OUYANG Zhen-hua, QI Qing-xin, ZHANG Yin, et al. Mechanism and experiment of hydraulic fracturing in rock burst prevention[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(Suppl.2): 321—325.
- [10] 吴景浓, 李健康, 颜玉定, 等. 室内水压致裂法的初步实验研究[J]. 水利学报, 1982, 8(7): 52—57.
WU Jing-nong, LI Jian-kang, YAN Yu-ding, et al. Preliminary experimental study on indoor hydraulic

- fracturing[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1982, 8(7): 52—57.
- [11] REINICKE A, RYBACKI E, STANCHITS S, et al. Hydraulic fracturing stimulation techniques and formation damage mechanism: implications from laboratory testing of tight sandstone-proppant systems[J]. **Chemieder Erde-Geochemistry**, 2010, 70(S3): 107—117.
- [12] 简浩, 朱维申, 李术才, 等. 模拟节理岩体水压致裂的 CT 实时试验初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1655—1662.
- JIAN Hao, ZHU Wei-shen, LI Shu-cai, et al. Real-time CT test of hydraulic fracture process for jointed rockmasses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(11): 1655—1662.
- [13] TAN P, JIN Y, HOU B, et al. Experiments and analysis on hydraulic sand fracturing by an improved true triaxial cell[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2017, 158:766—774.
- [14] 刘元坤, 艾凯, 尹健民, 等. 水压劈裂测试系统设计研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005, 3: 65—67, 118.
- LIU Yuan-kun, AI Kai, YIN Jian-min, et al. The design research and application of hydro-jacking test system[J]. **Ground Pressure and Strata Control**, 2005, 3: 65—67, 118.
- [15] 詹美礼, 岑建. 岩体水力劈裂机制圆筒模型试验及解析理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1173—1181.
- ZHAN Mei-li, CEN Jian. Experimental and analytical study on hydraulic fracturing of cylinder sample[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1173—1181.
- [16] BOHLOLI B, DE PATER C J. Experimental study on hydraulic fracturing of soft rocks: influence of fluid rheology and confining stress[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2006, 53(1/2): 1—12.
- [17] 周长冰, 万志军, 张源, 等. 高温条件下花岗岩水压致裂的实验研究[J]. 中国矿业, 2017, 26(7): 135—141, 146.
- ZHOU Chang-bing, WAN Zhi-jun, ZHANG Yuan, et al. Experimental study on hydraulic fracturing of granite specimens under high temperature[J]. **China Mining Magazine**, 2017, 26(7): 135—141, 146.
- [18] 梁超, 吕力行, 童祥轩. 基于钻孔水压致裂法地应力测试设备的优化[J]. 价值工程, 2016, 35(7): 234—236.
- LIANG Chao, LÜ Li-xing, TONG Xiang-xuan. Optimization of the crustal stress test equipment based on borehole hydraulic method[J]. **Value Engineering**, 2016, 35(7): 234—236.
- [19] 姚飞, 陈勉, 吴晓东, 等. 天然裂缝性地层水力裂缝延伸物理模拟研究[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(3): 83—86.
- YAO Fei, CHEN Mian, WU Xiao-dong, et al. Physical simulation of hydraulic fracture propagation in naturally fractured formations[J]. **Oil Drilling & Production Technology**, 2008, 30(3): 83—86.
- [20] 侯振坤, 杨春和, 王磊, 等. 大尺寸真三轴页岩水平井水力压裂物理模拟试验与裂缝延伸规律分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 407—414.
- HOU Zhen-kun, YANG Chun-he, WANG Lei, et al. Hydraulic fracture propagation of shale horizontal well by large-scale true triaxial physical simulation test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 407—414.
- [21] 陈江湛, 曹函, 孙平贺, 等. 三轴加载下煤岩脉冲水力压裂扩缝机制研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1023—1031.
- CHEN Jiang-zhan, CAO Han, SUN Ping-he, et al. Mechanisms of fracture extending in coal rock by pulse hydraulic fracturing under triaxial loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(4): 1023—1031.
- [22] 刘洪磊, 杨天鸿, 于庆磊, 等. 岩石水压致裂影响参数的仿真[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(10): 1483—1486.
- LIU Hong-lei, YANG Tian-hong, YU Qing-lei, et al. Simulation of influence parameters during hydraulic fracturing process of rock[J]. **Journal of Northeastern University(Natural Science)**, 2012, 33(10): 1483—1486.
- [23] 张广清, 陈勉. 水平井水力裂缝非平面扩展研究[J]. 石油学报, 2005, 26(3): 95—97, 101.
- ZHANG Guang-qing, CHEN Mian. Non-planar propagation of hydraulic fracture near horizontal wellbore[J]. **Acta Petrolei Sinica**, 2005, 26(3): 95—97, 101.
- [24] 刘洪, 张光华, 钟水清, 等. 水力压裂关键技术分析与研究[J]. 钻采工艺, 2007, 30(2): 49—52, 154.
- LIU Hong, ZHANG Guang-hua, ZHONG Shui-qing, et al. Analysis and research on key technologies of hydraulic fracturing[J]. **Drilling & Production Technology**, 2007, 30(2): 49—52, 154.
- [25] 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—434.
- 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—434.
- [26] 冷雪峰, 杨天鸿, 国怀专, 等. 单孔岩石水压致裂过程的数值模拟分析[J]. 世界有色金属, 2002, 10: 32—34.
- LENG Xue-feng, YANG Tian-hong, GUO Huai-zhuan, et al. Numerical simulation and analysis of rocks with single hole each under hydraulic fracturing[J]. **World Nonferrous Metals**, 2002, 10: 32—34.
- [27] DOE T W, BOYCE G. Orientation of hydraulic fractures in salt under hydrostatic and non-hydrostatic stresses[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1989, 26(6): 605—611.