

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.014

## 水中高压脉冲放电致裂岩体实验研究\*

秦爽,赵金昌,卞德存

(太原理工大学 矿业工程学院,太原 030024)

**摘要:** 在以煤层气井脉冲放电致裂增渗为工程背景,对在耦合静水压下煤岩体受到脉冲放电冲击波致裂机理分析的基础上,采用混凝土试样代替煤岩体,使用自我研发设计的可以改变静水压和试样三轴围压的实验装置,对混凝土试样在不同地应力(0~8 MPa)、静水压(0~2 MPa)、放电参数(10 KV 或 14 kV)下进行了脉冲放电致裂实验,研究地应力、静水压、放电参数对混凝土试样裂纹延展方向和长度的影响规律。研究表明:地应力抑制裂纹的产生及扩展,裂纹方向为垂直于最小主应力方向;静水压不影响裂纹的延展方向,静水压增大可以加快裂纹的延展速度和长度;高电压下裂纹扩展长度及贯通效果较好,高电压下裂纹长度有所增加。在实际的应用中,可以提高设备的放电电压增加对煤岩体致裂效果。

**关键词:** 脉冲放电;冲击波;静水压;致裂效果

中图分类号: O625 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2020)01-0100-07

## Study on Fractured Rock Mass caused by High Pressure Pulse Discharge in Water

QIN Shuang, ZHAO JIN-chang, BIAN De-cun

(College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** This paper takes cracks by the pulse discharge and seepage enhancement of coalbed methane well as the engineering background and analyzes the mechanism of the shock wave cracking of the coal rock mass by the pulse discharge, under the coupled hydrostatic pressure. Using the concrete sample instead of the coal rock mass and the self-developed experimental equipment which can change hydrostatic pressure and sample triaxial confining pressure, the pulse discharge caused cracking experiment was carried out for the concrete sample with different concrete stress (0~8 MPa), hydrostatic pressure (0~2 MPa), and discharge parameters (10 kV or 14 kV) to study the influence of ground stress, hydrostatic pressure and discharge parameters on the crack propagation direction and length of concrete specimens. The research shows that ground stress curbs the generation and expansion of the crack and the crack direction should be perpendicular to that of the minimum principal stress. The hydrostatic pressure does not affect the direction of the crack, and the increase of hydrostatic pressure can accelerate the expansion speed and length of the crack. It is good for the extension length and penetration effect under high voltage, and the crack length increases at high voltage. In practical applications, it is effective to improve the cracking effect by increase the device's discharge voltage on coal rock mass.

**Key words:** pulse discharge; shock wave; hydrostatic pressure; cracking effect

在煤层气井致裂增透施工中,高压脉冲放电产

生的冲击使得煤岩体产生裂纹,其中裂纹产生机理、起裂、扩展规律,是研究人员研究关注的重点<sup>[1]</sup>。煤岩体具有较强的非均质性和各向异性,受到冲击荷载作用后的破裂过程也较为复杂,第一地应力对裂纹影响规律尚无明确结论<sup>[2]</sup>,第二放电参数影响

收稿日期:2019-06-12

作者简介:秦爽(1992-),男,硕士研究生,从事高压脉冲放电致裂方向研究,(E-mail)594081689@qq.com。

基金项目:山西省一般自然科学基金(201701D22111223)

冲击波加载特性<sup>[3]</sup>,而煤岩体中裂纹扩展规律又与冲击荷载的加载特性密切相关<sup>[4]</sup>,第三阶段实验使用的脉冲放电致裂实验台无法提供围压和静水压。

使用自主研发的高压脉冲放电致裂实验台可以提供不同围压和静水压,再以均质混凝土试样代替煤岩体试样进行静水压高压脉冲放电致裂实验,并对试件表面进行显微放大拍摄处理。研究在不同地应力、放电参数、静水压下混凝土试样裂纹起裂延展规律。

### 1 致裂机理研究

在静水压作用下高压脉冲放电致裂岩体可分为水激波的冲击作用阶段和水压的准静态作用阶段<sup>[5,6]</sup>。水激波的冲击作用阶段为电极在岩体中的放电,在水中产生一个冲击波,对岩体施加一个冲击载荷,压力迅速达到峰值,岩体内产生一个应力脉冲波<sup>[7]</sup>。水压的准静态作用阶段作用时间较水激波的冲击作用时间长得多,且压力值相对稳定,是在岩体原始裂隙及水激波冲击作用产生的初始裂隙的基础上产生进一步作用的<sup>[8-10]</sup>。

### 2 实验准备

#### 2.1 实验设备组成及工作原理

本实验研制了一套具有真三轴加载能力、放电能量

可调、钻孔中注水压力可调的高压脉冲放电致裂实验台,尽可能重现井下煤岩体致裂环境。见图1。

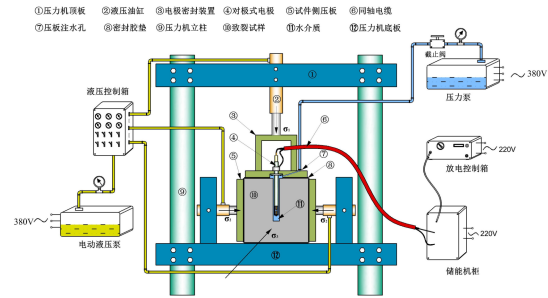


图 1 高压脉冲放电致裂实验台

Fig. 1 The high-voltage pulsed discharge fracturing test-bed

高压脉冲放电致裂实验台(图2)由高压脉冲放电系统、静水压加载系统(恒压恒流水压泵)、真三轴围压加载系统三部分组成。高压脉冲放电系统。由储能机柜、放电控制箱、放电电极、同轴电缆,其负责将储存的电能经过电极转化为冲击波,作用与混凝土试件,技术参数见表1。电极密封装置和对极式放电电极结构图及实物照片如图3所示。

#### 2.2 致裂试样制备

混凝土试件按质量(水泥:河沙:水=1:3:0.5)进行配比,试件尺寸300 mm×300 mm×300 mm立方体,养护28 d。在混凝土试样上表面中心钻孔,钻孔直径30 mm,深200 mm如图4。



(a)高压脉冲放电系统

(a)High voltage pulse discharge system



(b)静水压加载系统

(b)Hydrostatic loading system



(c)真三轴围压加载系统

(c) True triaxial confining pressure loading system

图 2 高压脉冲放电致裂实验台

Fig. 2 The high-voltage pulsed discharge fracturing test-bed

表 1 高压脉冲放电系统参数表

Table 1 Technical parameters of high-voltage pulsed discharge system

项目	输入电源	功率	脉冲放电电压	单次脉冲能量	电容值
参数	220 V 50 Hz 交流电	1 kW	5~15 kV	0.75~6.75 kJ	60 μF
项目	脉冲间隔	设备寿命	触发方式	放电间距	充电误差
参数	20 s	大于 1 万次	手动/自动	5 mm	< 5%

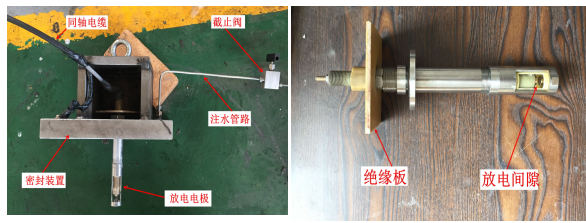


图3 电极结构图

Fig. 3 Electrode structure diagram



(a) 拆模

(b) 密封面抛光

(c) 试件钻孔

(a) Mold removal (b) Sealing surface polishing (c) Specimen drilling

图4 混凝土试件

Fig. 4 The concrete specimen

### 2.3 混凝土试样力学性质测试

取一块混凝土试样钻孔取芯。得到大小为 $\phi 50 \times 100$  mm 单轴抗压试样,测试得抗压强度 19.11 MPa, $\phi 50$  mm  $\times$  25 mm 巴西劈裂试样,测试得抗拉强度 1.37 MPa。见图5,表2。



(a) 取芯

(b) 单轴抗压试样

(c) 巴西劈裂试样

(a) Coring

(b) Uniaxial compression test sample

(c) Brazilian splitting test sample

图5 混凝土强度测试试样

Fig. 5 Test samples of concrete specimen strength

表2 混凝土强度实验结果

Table 2 The test results of concrete specimen strength

试件编号	尺寸/mm	破坏荷载/kN	单轴抗压强度 /MPa	试件编号	尺寸 /mm	破坏荷载/kN	单轴抗拉强度 /MPa
C-1	$\Phi 48.8 \times 99.7$	38.36	20.51	B-1	$\phi 48.6 \times 25.3$	2.74	1.42
C-2	$\Phi 49.2 \times 98.6$	33.61	17.68	B-2	$\phi 48.2 \times 24.8$	2.52	1.34
C-3	$\Phi 48.6 \times 99.6$	35.86	19.33	B-3	$\phi 49.3 \times 24.2$	2.85	1.52
C-4	$\Phi 49.5 \times 100.2$	41.22	21.42	B-4	$\phi 48.6 \times 24.5$	2.75	1.47
C-5	$\Phi 49.3 \times 98.8$	37.09	19.43	B-5	$\phi 49.3 \times 23.9$	2.44	1.32
C-6	$\Phi 48.8 \times 100.4$	34.32	18.35	B-6	$\phi 48.7 \times 25.1$	2.46	1.28
C-7	$\Phi 48.8 \times 98.4$	34.55	18.47	B-7	$\phi 49.2 \times 24.4$	2.70	1.43
C-8	$\Phi 48.2 \times 99.2$	32.33	17.72	B-8	$\phi 48.3 \times 24.1$	2.21	1.21
平均值	$\Phi 48.9 \times 99.4$	35.90	19.11	平均值	$\phi 48.8 \times 24.5$	2.58	1.37

## 3 脉冲放电致裂实验方案

### 3.1 参数设置

将养护好的混凝土试样编号1~10。实验参数如表3所示。

### 3.2 实验步骤

高压脉冲放电致裂实验操作流程如图6所示。装配图见图7。

## 4 脉冲放电致裂裂纹扩展规律分析

在高压脉冲放电实验中,间隔一定放电次数,拆除混凝土试件上表面的密封装置,对裂纹的扩展形态长度进行观测和记录。见图8。

### 4.1 地应力对裂纹扩展的影响

将混凝土试件1,3,5号编为第一组,2,4,6号编为第二组,进行组内对照试验。图9是在不同地应力下放电冲击产生的裂纹照片及素描图。混凝土试件按照“上北下南、左西右东”方向摆放。

对两组混凝土试件对照可以发现:

(1)混凝土试件1号2号在无地应力下,裂纹各方向上均有扩展,冲击次数在30次内贯通。

(2)混凝土试件3号4号地应力较混凝土试件1号2号地应力增加,混凝土试件在手地应力干扰后,裂纹在垂直于最小主应力方向延展,贯通时冲击次数增多。

(3)混凝土试件5号6号收到地应力再次增加,裂纹没有贯通,且长度较短,方向为垂直于最小主应力。

表 3 混凝土试样实验参数

Table 3 The experimental parameters settings of concrete specimens

试件编号	地应力/MPa			静水压/MPa	放电参数	
	轴压 $\sigma_1$	南北 $\sigma_2$	东西 $\sigma_3$		放电电压/kV	电容值/ $\mu\text{F}$
1	0	0	0	0	10	60
2	0	0	0	0	14	30
3	3	2	1	0	10	60
4	3	2	1	0	14	30
5	8	6	2	0	10	60
6	8	6	2	0	14	30
7	8	6	2	1	10	60
8	8	6	2	1	14	30
9	8	6	2	2	10	60
10	8	6	2	2	14	30

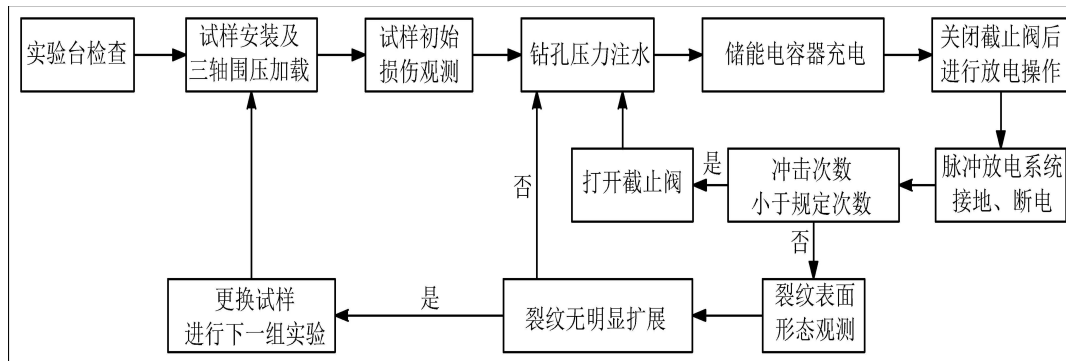
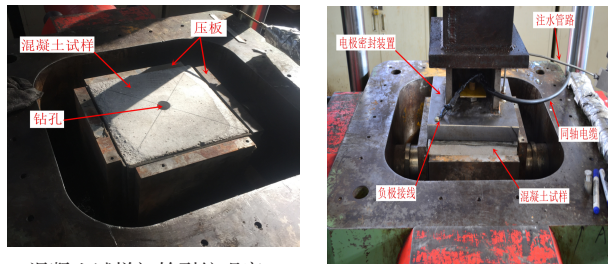


图 6 高压脉冲放电致裂实验操作流程

Fig. 6 The operation flow diagram of fracturing experiment by high-voltage pulsed discharge



(a)混凝土试样初始裂纹观察  
(a) Observation of initial cracks in concrete samples

(b)试样装配  
(b) Sample assembly

图 7 致裂实验试样装配图

Fig. 7 Sample assembly drawing of fracturing experiment

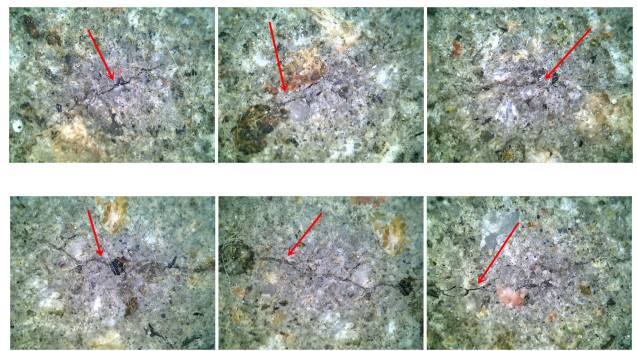


图 8 部分裂纹显微放大照片

Fig. 8 The microscopic photographs of some fracturing cracks

由图 10 可知:地应力增大,试件表面裂纹长度  
综上所述,脉冲放电致裂岩体的过程中地应力  
制约裂纹扩展。地应力增加,裂纹贯通需要的冲击  
次数增加,裂纹长度缩短,当地应力差值较大,裂纹  
在垂直于最小主应力方向延展。

#### 4.2 静水压对裂纹扩展的影响

按照试验参数静水压分别为 0、1、2 MPa,对混  
凝土试件 5~10 号分组,对照,研究静水压对裂纹扩

速率减慢,最终长度较短。  
展规律影响。见图 11。

将试件 H5~H10 分为两组,进行组内对照,如  
图 12。

通过对照发现:地应力相同时,裂纹的扩展方  
向相同,垂直于最小主应力的方向。静水压的大小  
不会影响到裂纹的扩展方向,但加快了裂纹延展速  
度。且静水压越高,裂纹扩展速度越快。

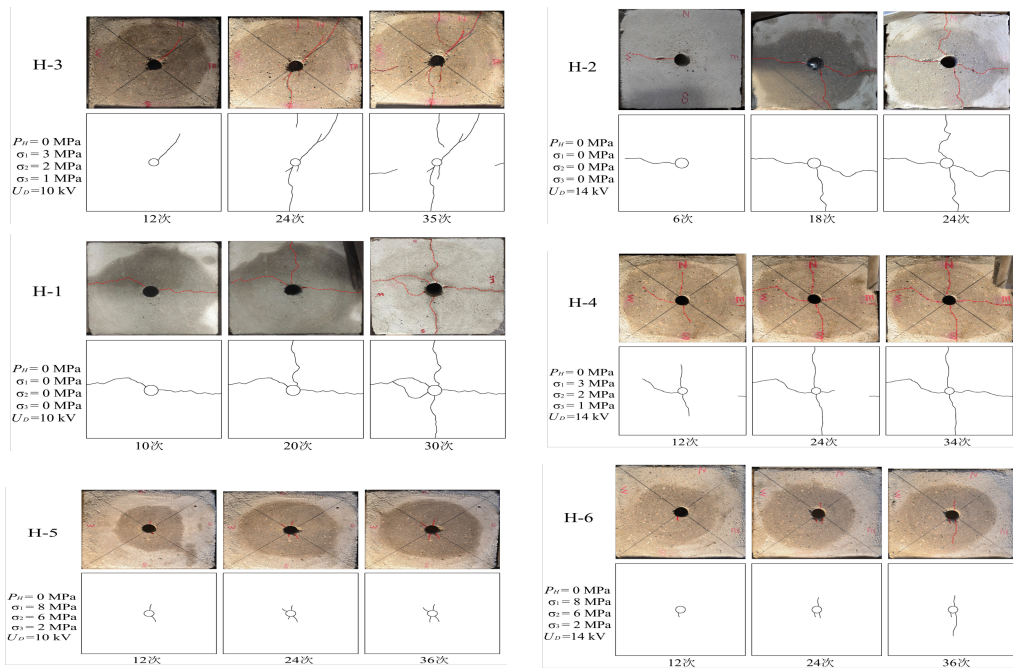


图9 不同地应力条件下裂纹

Fig. 9 Crack under different stress conditions

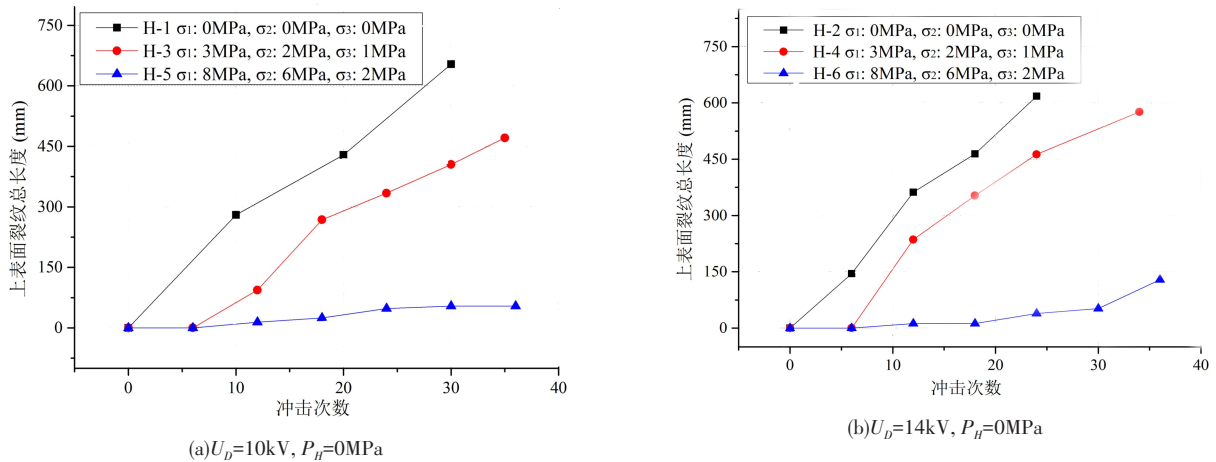


图10 不同地应力条件下脉冲放电致裂裂纹长度统计

Fig. 10 The cracks' length of pulsed discharge fracturing under different geostress

### 5.3 放电参数对裂纹扩展的影响

在表3中,将6个混凝土试样分为3个对照组如图13。研究不同放电电压与电容组合对试样裂纹扩展规律的影响。

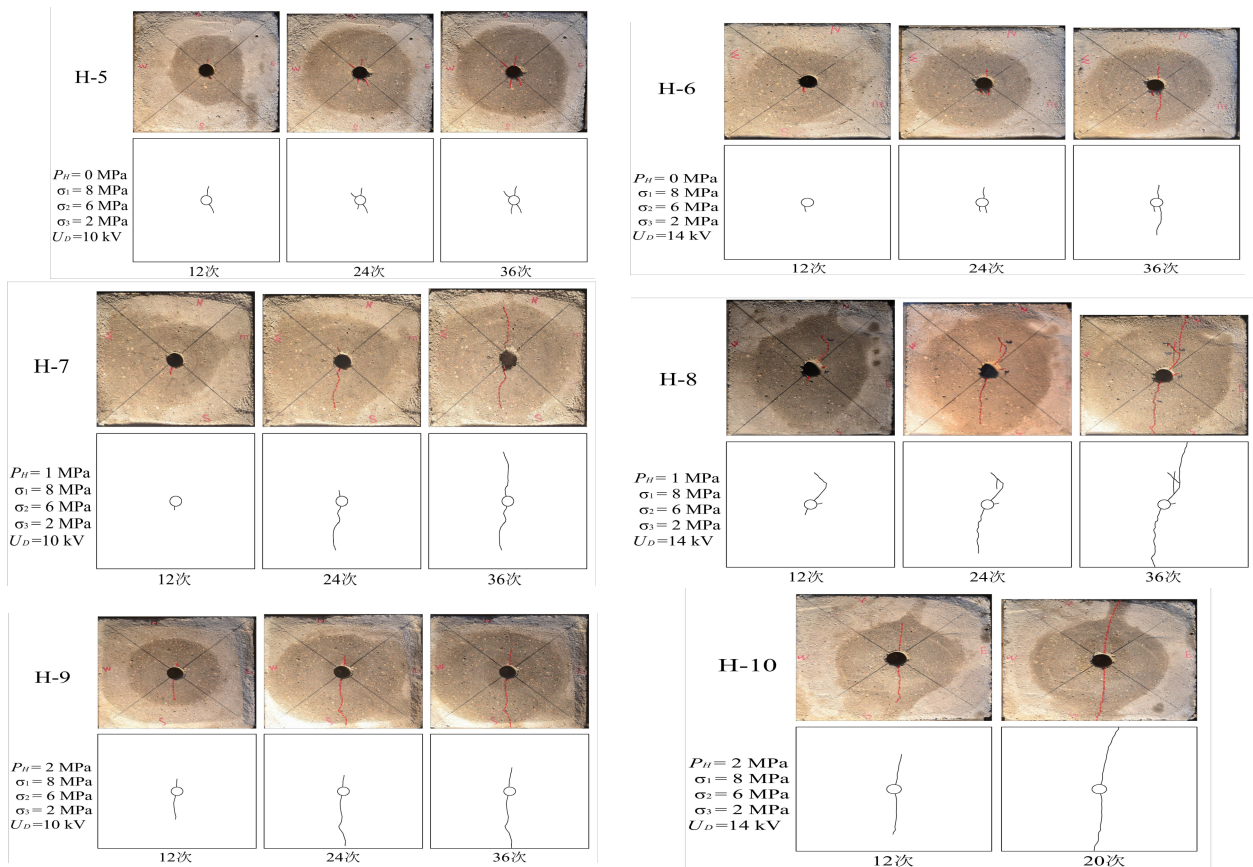
图13是相同条件下,不同放电电压对试样进行脉冲放电致裂实验,试样表面裂纹长度统计图。得到了,在同种条件下,高电压致裂效果略优于低电压致裂效果,裂纹长度增加。虽然不同电压下的脉冲放电总能量不变,但放电电压较高,冲击效果较好,相对而言更多的能量作用于试件上,使得致裂效果较好。在实际

的应用中,可以提高设备的放电电压使得对煤岩体致裂效果增加。

## 5 结语

以混凝土试样替代煤岩体试样,对试样进行了脉冲放电致裂实验。研究了不同地应力、静水压和放电参数对混凝土试样裂纹延展规律。研究表明:

(1)地应力增加,抑制裂纹的扩展,地应力有差值时,裂纹在垂直于最小主应力方向延展。



11 不同静水压下脉冲放电致裂裂纹扩展规律

Fig. 11 The cracks' propagation of pulsed discharge fracturing under different hydrostatic pressure

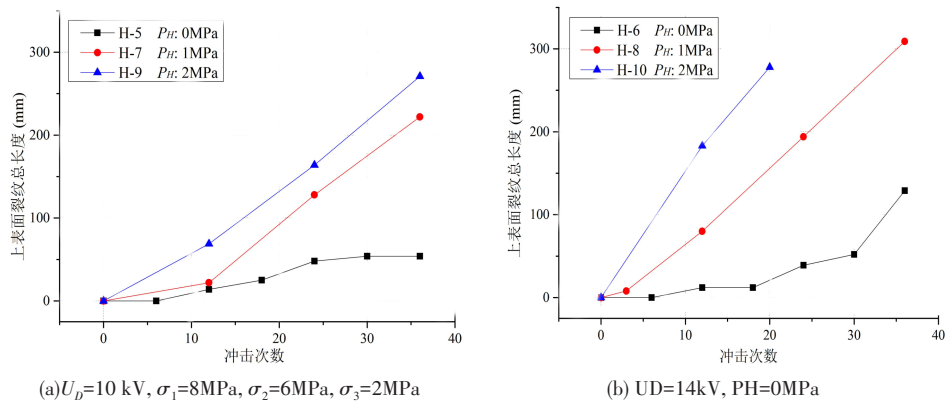


图 12 不同静水压下脉冲放电致裂裂纹长度统计

Fig. 12 The cracks' length of pulsed discharge fracturing under different hydrostatic pressure

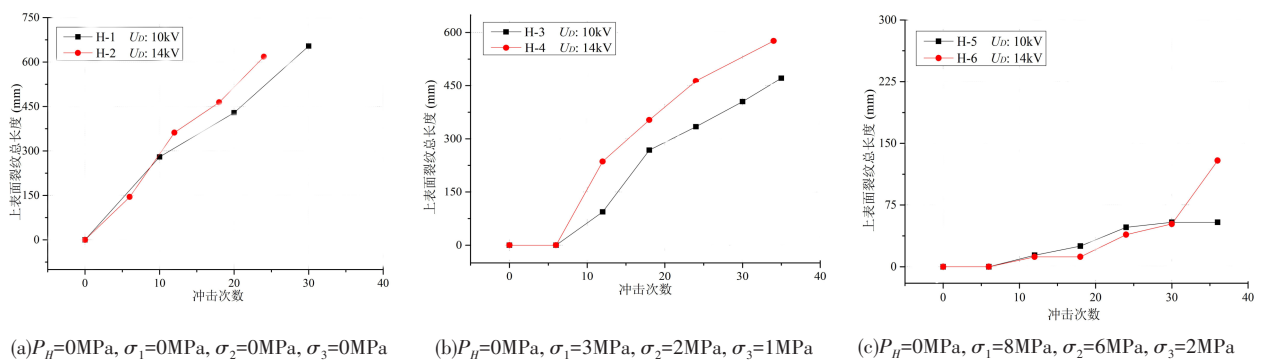


图 13 不同放电电压致裂裂纹长度统计

Fig. 13 The cracks' length of pulsed discharge fracturing under different discharge voltage

(2)静水压的大小对裂纹的扩展方向无影响,但静水压的增加促进裂纹的延展速度及长度。

(3)高电压致裂效果略优于低电压致裂效果,高电压下裂纹长度有所增加。在实际的应用中,可以提高设备的放电电压使得对煤岩体致裂效果增加。

### 参考文献(References)

- [1] 李清,徐文龙,郭洋,等.柱状炮孔端部爆生裂纹动态扩展力学行为研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(2):267-275.
- [1] LI Qing, XU Wen-long, GUO Yang, et al. Mechanical behavior of dynamic propagation of burst crack at the end of cylindrical gun hole [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(2):267-275. (in Chinese)
- [2] 周磊,朱哲明,刘邦,等.裂纹位置与深度对围岩岩体稳定性的影响分析[J].现代隧道技术,2019,56(1):130-138.
- [2] ZHOU Lei, ZHU Zhe-ming, LIU Bang, et al. Impact analysis of crack location and depth on stability of surrounding rock mass [J]. Modern Tunnel Technology, 2019, 56(1):130-138. (in Chinese)
- [3] 卞德存.静水压下脉冲放电冲击波特性及其岩体致裂研究[D].太原:太原理工大学,2018.
- [3] BIAN De-cun. Characteristics of pulsed discharge shock wave under hydrostatic pressure and study on rock mass fracture [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [4] 李海涛,张振华,牟金磊,等.水下爆炸作用下弹塑性船体梁整体运动模型及损伤特性[J].工程力学,2019,36(1):238-247.
- [4] LI Hai-tao, ZHANG Zhen-hua, MU Jin-lei, et al. Integral motion model and damage characteristics of elastic-plastic hull beam under underwater explosion [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(1):238-247. (in Chinese)
- [5] 尹志强.水中高压脉冲放电的液电特性及煤体致裂效果研究[D].太原:太原理工大学,2016.
- [5] YIN Zhi-qiang. Hydroelectricity characteristics of high pressure pulse discharge in water and coal cracking effect [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [6] 鲍先凯.高压电脉冲水压压裂煤体机理及实验研究[D].太原:太原理工大学,2018.
- [6] BAO Xian-kai. Mechanism and experimental study of high voltage electric pulse hydraulic fracturing of coal [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [7] 韩国振,杨赞.穿廊式坑道出入口冲击波传播规律数值模拟研究[C]//第27届全国结构工程学术会议论文集(第II册).2018:48-53.
- [7] HAN Guo-zhen, YANG Zan. Wear existent tunnel entrances shockwave propagation law numerical simulation research [C] // Proceedings of the 27th the Structure Engineering Academic Conference (the First II Copies). 2018:48-53. (in Chinese)
- [8] 张焕好,郭则庆,王瑞琦,等.水下超声速气体射流的初始流动特性研究[J].振动与冲击,2019,38(6):88-93.
- [8] ZHANG Huan-hao, GUO Ze-qing, WANG Rui-qi, et al. Initial flow characteristics of underwater supersonic gas jet [J]. Vibration and Impact, 2019, 38(6):88-93. (in Chinese)
- [9] 贾少华.基于液电效应的水激波时域特性及煤体致裂效果研究[D].太原:太原理工大学,2016.
- [9] JIA Shao-hua. Time-domain characteristics of water shock wave and coal cracking effect based on hydroelectricity effect [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [10] 何起光.激波管冲击载荷作用下预制孔铝板的响应特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [10] HE Qi-guang. Response characteristics of prefabricated porous aluminum plate under shock tube impact load [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)