

高压电脉冲水力压裂法煤层气增透的试验与数值模拟

鲍先凯^{1, 2}, 杨东伟¹, 段东明¹, 武晋文³

(1. 内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024;
3. 中北大学 理学院, 山西 太原 030051)

摘要: 为了提高低渗透性煤层气的抽采效率, 揭示高压电脉冲水力压裂技术对煤体产生裂缝的效果及裂缝的扩展演化规律, 通过实验室试验, 对煤样进行单纯静水压裂(3 MPa)和相同水压力(3 MPa)、不同放电电压(5, 10 kV)条件下的高压电脉冲水力压裂试验, 应用 CT 扫描技术分析了煤样内部裂纹的起裂、发展、分布情况; 建立数值模拟分析水压电脉冲作用下裂隙的发展规律和裂缝周边的应力分布情况。研究表明: 在相同静水压力作用下, 高压电脉冲水力压裂煤层比单纯静水压力致裂效果明显; 放电电压越高, 在裂隙尖端产生的拉应力值越大, 煤体易产生疲劳损伤破坏, 裂隙易产生、易发展; 放电电压越高, 裂纹数量越多, 裂纹的起裂时间更早, 裂缝延伸长度更长, 宽度更宽, 致裂效果更好; 可证明高压电脉冲水力压裂煤层方法有效, 技术可行。

关键词: 岩石力学; 瓦斯抽采; 煤层气; 水压致裂; 高压电脉冲

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2017)10 - 2415 - 09

The experiment and numerical simulation of penetration of coalbed methane upon hydraulic fracturing under high-voltage electric pulse

BAO Xiankai^{1, 2}, YANG Dongwei¹, DUAN Dongming¹, WU Jinwen³

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China;
2. School of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China; 3. School of Science, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of methane extraction from coalbed with low permeability, to reveal the effect of high voltage electric pulse on hydraulic fracturing in coal and the development of crack expansions, the laboratory tests of hydraulic fracturing using the high voltage electric pulse on coal samples were carried out under pure hydrostatic(3 MPa) and the same hydraulic pressure(3 MPa), different discharge voltages(5, 10 kV). CT scanning was employed to analyze the initiation, development and distribution of the internal cracks in coal sample. The numerical analysis of the development of fissures and the periphery stress around the fissures under the action of hydraulic electric pulse were carried out. The results show that under the same hydrostatic pressure, the effect of high voltage pulse on hydraulic fracturing of coal is greater than hydrostatic pressure fracturing. The higher the discharge voltage is, the greater the tensile stress in the crack tip is and the crack is easier to produce and develop.

收稿日期: 2017 - 04 - 25; **修回日期:** 2017 - 06 - 08

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51504220); 山西省煤层气联合研究基金资助项目(2012012012); 内蒙古自然科学基金(2016MS0511)
Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51504220), Shanxi Province United Foundation for Coalbed Methane(Grant No. 2012012012) and Natural Science Foundation of Inner Mongolia(Grant No. 2016MS0511)

作者简介: 鲍先凯(1974 -), 男, 2003 年毕业于太原理工大学地下工程专业, 现为博士研究生、副教授, 主要从事煤层气开发与利用方面的研究工作。
E-mail: bxkzlm@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0507

The higher the discharge voltage is, the more cracks there are, the earlier the crack initiation, the longer and wider the crack extensions are, and the better the crack fracturing effect. The results of the study proved that the high-voltage pulsed hydraulic fracturing method is effective and feasible.

Key words: rock mechanics; gas extraction; coalbed methane; hydraulic fracturing; high voltage electric pulse

1 引言

煤层气(煤矿瓦斯)是一种清洁能源,我国煤层气资源丰富,但是我国煤层气普遍具有饱和度低、渗透性差、煤层物理力学条件差,难抽采的特征^[1-2]。因此我国煤层气资源利用率不高,抽采率在 30%~40%,目前美国煤层气的抽采率处于世界前列,一般为 30%~60%,最高可达 80%^[3]。为了增加煤层气的抽采率,必须先增加煤层气的渗透率,这就需要利用人工的方法对煤岩储气层进行结构改造,增加裂隙,改善渗透性。传统的增加煤层气渗透率的方法主要有采动卸压^[4-5]、爆破卸压^[6]增透方法、钻孔增透方法^[7-9]、高压液体扰动致裂增透方法^[10-12]、注热蒸汽^[13]、二氧化碳驱替技术^[14-15]。这些方法或技术已经取得了一定效果,促进了我国煤层气产业的发展,但受到我国煤层地质条件、煤层气赋存条件、现场施工技术、生产成本等因素影响,现有的增透方法在现场工程施工中有时效果并不十分明显。

目前水力压裂技术广泛应用于石油、天然气以及煤层气的增产增注上,在地面通过煤层钻孔可以增加煤岩体的裂缝数量和透气性^[16]、降低煤岩体的地应力^[17],为低渗透性煤层气抽采提供了一条有效的技术途径。但是常规的水力压裂需要水压力较高(一般 25 MPa 以上)高压泵及其配套设备构造复杂,体积庞大;又由于注水压力高,对本煤层钻孔封孔要求也比较高,所以封孔困难、封孔率低,有时会导致钻孔压裂失败。为此,在常规水力压裂的基础上引进水中高压放电技术,利用水中高压放电形成的脉动冲击波,对煤体进行多次重复冲击与振动,促使煤体裂隙发育、扩展成网,增加煤层的通透性,为煤层瓦斯流动创造条件。贾少华等^[18]分析研究了高压电脉冲水激波波前时间与放电电压、峰值压力的关系。尹志强等^[19]通过试验研究了放电能量和水激波加载特性的关系,发现放电能量越大,水激波加载效果越好。这些研究为煤层高压电脉冲水压致裂提供了一定的理论基础,但是对于致裂机制和致裂效果,尚缺乏深入的研究。

本文通过对高压电脉冲水力压裂原理的分析,

进行了实验室试验和数值模拟计算,比较了煤样在单纯水力压力作用下和相同水压,不同放电电压下裂隙的产生、发展、分布,研究了裂缝起裂扩展规律,分析了裂缝扩展和裂缝周边应力的关系。

2 高压电脉冲水压致裂的原理

高压电脉冲水压致裂技术就是在高压静水压压裂的基础上,水中高压放电产生脉冲荷载。利用高压脉冲荷载在裂隙尖端形成的水激波及振动效应,通过改变裂隙的参数和形态特征来改善瓦斯的赋存环境,促进瓦斯由吸附状态向游离状态转变,达到增大煤层气的渗透性、提高煤层气抽采效率的目的。水下高压放电与水下爆炸物爆炸现象类似,均会产生气泡脉动和冲击波作用。气泡脉动和水激波对煤层壁的持续加载,促使煤壁产生新的裂隙或使原生裂隙进一步延伸扩展,相互贯通,这样自然会提高煤层的渗透性。

2.1 冲击波原理

冲击波由水中高压电极瞬间放电产生,同时使周围水体汽化。冲击波在产生之后,能迅速的向外传播,经水气交界面,最后进入水中。冲击波的特点是:(1)产生的压力高,在爆炸中心能达到几个大气压^[20];(2)持续的时间很短,一般为毫秒级。所以水下冲击波在非常短的时间内会对附近的结构产生强大的破坏力,在冲击波强大的压力作用下,结构体迅速屈服,发生严重损伤,直至断裂。因此水下冲击波对结构的破坏非常大。冲击波所携带的能量可以用下式计算:

$$E_s = \frac{K_1 \pi S^2}{\rho c} \int_0^{6.7\tau} P_s(t)^2 dt \quad (1)$$

式中: E_s 为冲击波能量, $P_s(t)$ 为冲击波压力, K_1 为经验系数, τ 为冲击波时间常数, t 为冲击波时间, S 为电极到压力传感器的距离, ρ 为水的密度, c 为水中声速。

2.2 气泡脉冲原理

高压电极在瞬间放电后,电能将加热水并使其汽化,变成高温、高压气体,该气体被周围的水围

成气泡^[21]。若将水看成不可压缩的介质, 则气泡内部的高压将驱使其周围的水以小于声速的速度向外扩散运动(滞后流)。然后气泡发生膨胀, 内部压力逐渐减小, 直到压力仅是外部静水压力的很小一部分, 这时气泡表面的负压差使气泡的膨胀运动停止, 在周围静水压力作用下, 气泡开始产生收缩运动(坍塌), 然后气泡内部压力又开始不断增加, 该过程会瞬间逆转过来^[22-24], 这种不断重复的过程直到气泡破裂为止, 这一过程被称为气泡脉动。

气泡脉动驱动周围水体运动, 形成滞后流, 气泡收缩时内部会产生脉动压力^[25], 低频的滞后流及脉动压力均对结构体造成总体破坏。如果结构体固有频率和气泡脉动频率接近时, 会加剧对结构体的破坏作用^[26-27]。由于高压放电瞬间会产生很多气泡, 这种气泡脉动压力对结构的破坏是相当大的。气泡脉冲所产生的压力脉冲为

$$P - P_h = \rho_1 (R_b^2 \dot{R}_b + 2 \dot{R}_b R_b) / r - \dot{R}_b R_b^4 / (2r^4) \quad (2)$$

式中: ρ_1 为水密度, P_h 为静水压, r 为距放电中心的距离, R_b 为气泡半径, \dot{R}_b 为气泡半径对时间的导数。从式(2)可以看出, 气泡脉冲压力在水压基础上产生了大的跳跃, 对周围介质会产生很大的冲击。

2.3 高压电脉冲水力压裂增透技术

在煤层中钻孔, 孔中充满高压水, 在孔中放置高压放电电极, 并且外联高压放电控制器, 孔内实施高压电脉冲放电。

根据以上分析可知, 在充满水的钻孔中高压放电会产生脉冲冲击波和气泡脉动。气泡在煤壁表面附近振荡时, 由于气泡不断膨胀、收缩, 内部就会形成一股射流, 这种射流产生于远离煤壁表面的一边, 并且高速穿过气泡, 直至撞击到煤壁表面, 对煤壁产生严重的损伤。气泡数量众多, 作用时间长, 对整个钻孔会产生强大的破坏力, 危及煤体总体强度^[21]。另外冲击波携带能量大, 产生的脉动压力能够对钻孔周围煤体产生强烈的冲击振动作用, 在反复冲击作用下, 煤体强度降低, 出现疲劳损伤, 损伤不断积累, 进而导致煤体局部出现裂缝。在脉冲冲击波和脉动气泡循环往复作用下, 钻孔周围形成多条放射状裂缝, 高压水进入裂缝, 使得裂缝分叉、扩展, 延展并贯通煤层自然裂隙, 疏通了瓦斯流动通道, 减少了瓦斯运移阻力, 释放煤层瓦斯压力, 进而达到减阻增透、提高瓦斯抽采效率的目的。

3 煤层致裂增透试验

3.1 试验设备与试件制作

为了更好地研究高压电脉冲水压对煤岩体的致裂效果, 自主设计了如图 1 所示的试验系统。试验设备主要由放电电极、高压电脉冲放电装置、液泵、三轴伺服刚性压力室、钢管道 5 个部分组成。试验煤取自晋煤集团寺河煤矿, 然后将煤体制作成 300 mm×300 mm×280 mm 的立方体煤样 4 块(其中一块试件不合格, 弃用), 煤样中间预留 $\phi 26$ mm 注水孔, 如图 2 所示。

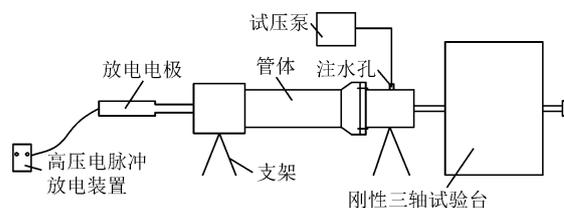


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Sketch of experimental equipment



(a)



(b)

图 2 未加工煤样和加工后煤样

Fig.2 Raw coal sample and coal sample after processing

3.2 试验步骤

将标准煤样放入压力室内, 然后对煤样试件进

行模拟地层压力条件下的高压电脉冲水压致裂试验。具体试验方法与步骤如下：

(1) 将 1[#]试件吊装入三轴压力室内，并保证试件钻孔位置对中，然后围压与轴压分级交替加载至设定值(竖向轴压 4 MPa，围压 3 MPa)，并始终保持轴压大于围压。

(2) 压力泵开始向试验压力室中 1[#]试件钻孔内注水并加压，待管道内水压达到 3 MPa 时，停止加压，并保持水压不变，不进行水中高压放电。

(3) 待 1[#]试件取出后，将 2[#]，3[#]试件分 2 次放入压力室，并保证试件钻孔的位置对中，围压与轴压分级交替加载至设定值(竖向轴压 4 MPa，围压 3 MPa)，并始终保持轴压大于围压。同时保证试件内水压 3 MPa 不变。

(4) 在 2[#]，3[#]试件上分别设置放电电压为 5 和 10 kV，接通放电开关，电极在高压水中多次重复放电后停止放电。

(5) 放电完成后，关掉高压脉冲电源，解除管道静水压力，排出管道内的水，将煤样吊出箱体。

(6) 将煤样取出后，沿煤样中心孔钻孔取样，然后进行 CT 扫描观察，观察煤样裂隙的产生、分布和发育情况。

4 试验结果分析

试验完成后，在试件中沿原有钻孔周边取样，制作好试件后拿到 CT 室，应用 μCT225KVFCB 显微 CT 机(见图 3)进行扫描研究比较裂隙的变化。CT 扫描完成后再经软件 VCTiS4.2.1 for Reconstruction 滤波、重建后，可获得试件断面不同层的扫描图像，然后对图像进行分析研究。

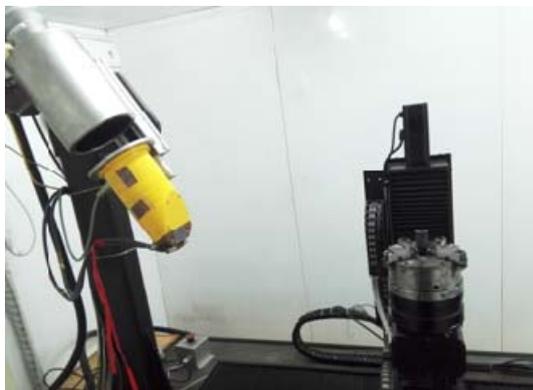


图 3 μCT225KVFCB CT 扫描仪
Fig.3 CT Scanner μCT225KVFCB

4.1 3 MPa 静水压力条件下 CT 扫描结果分析

经 CT 扫描，软件滤波重建后 1[#]试件钻孔试件扫描结果如图 4 所示(钻孔试件扫描后可构建有 1 500 多层，仅选有代表性的几层，其余层与之相似)。

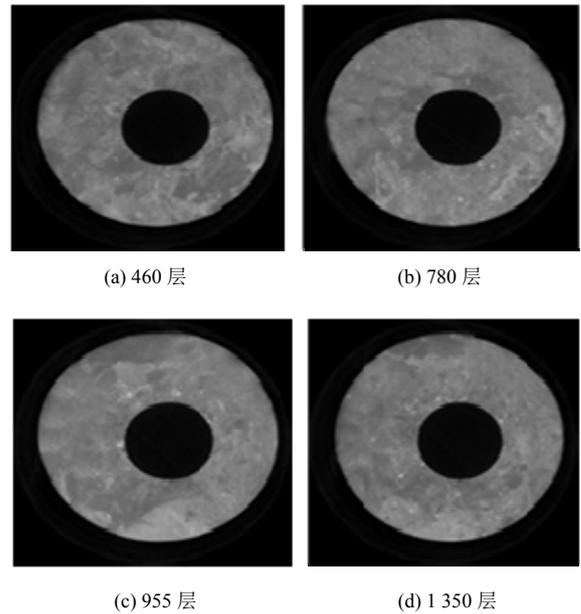


图 4 1[#]试件钻孔试件 CT 扫描图
Fig.4 CT scan on the sample #1

由图 4 可以看出，试件取样完整、形状规整，煤样致密度较好，表面稀疏散布着一些长度较短的硬煤质条带和一些硬质颗粒，节理不发育、不明显。在 3 MPa 静水压作用下，煤样无新的宏观及微观裂隙产生。由此扫描结果，可以看出单纯 3 MPa 静水压对煤体试件致裂效果不佳。

4.2 3 MPa 静水压 + 高压放电条件下 CT 扫描结果分析

试验完成后，将 2[#]，3[#]试件钻孔试件拿到 CT 实验室扫描，软件滤波重建后扫描结果分别如图 5，6 所示。

从图 5 可以看出，试件形状规整，致密度较好。在 5 kV 高压电脉冲水压作用下，煤样钻孔周边有 3 条裂隙产生，其中 2 条裂缝形似“一”字型，形状较规则，走向清晰，延展顺利，裂缝边际较平整，宽度均匀；另一条裂缝走向不规则，边际凹凸不平，在主裂隙延展出弯曲的微小张开的裂隙，同时主裂缝宽度不一，起裂位置较宽，随着裂缝的延展宽度逐渐收窄。

从图 6 可以看出，试件取样规则，新生裂隙增多。在 10 kV 高压电脉冲水压作用下，煤样钻孔周

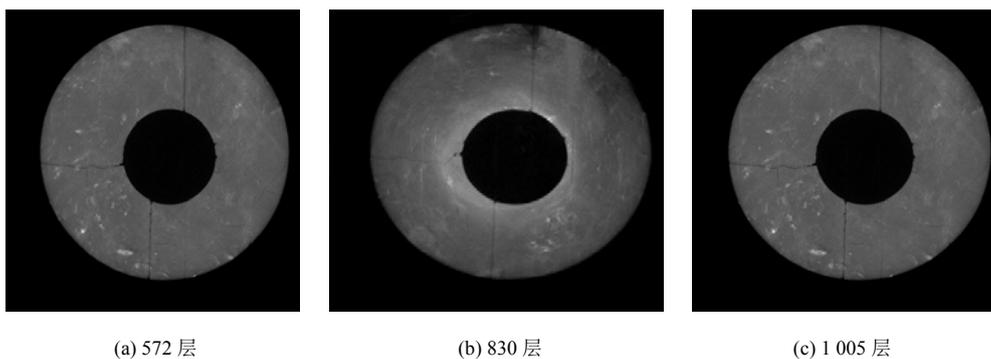


图 5 2[#]试件钻孔试件 CT 扫描图
Fig.5 CT scan on the sample #2

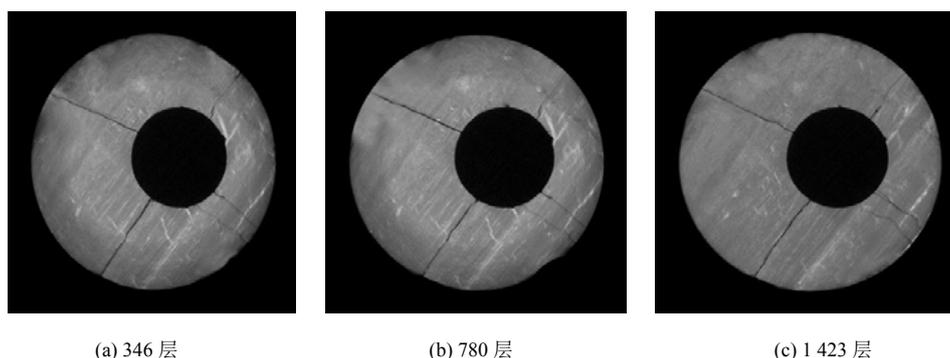


图 6 3[#]试件钻孔试件 CT 扫描图
Fig.6 CT scan on the sample #3

边产生了 5 条裂隙, 方位对称, 相对 5 kV 高压放电, 裂缝起裂位置相同, 其中 3 条裂缝形似“一”字型, 形状较规则, 走向清晰, 裂缝边际较平整, 但是宽度更宽, 延展长度更长; 另外 2 条裂缝走向不是十分规则, 边际凹凸不平, 而且在主裂隙又延展出几条弯曲的微小张开的裂隙, 随着裂缝的延展宽度逐渐变窄。

总体而言, 高压电脉冲水压作用下会产生新的裂隙, 裂隙形态各异, 这是因为在水中高压放电以后产生的水激波和气泡脉动对煤层壁持续加载, 随着脉动压力的持续增加, 煤壁先产生微裂隙, 进而在微裂隙尖端拉应力作用下, 裂隙发生损伤、破坏, 裂隙就会延伸扩展, 最后裂隙就会贯通, 煤层渗透性就会得到提高。相比于单纯 3 MPa 静水压的致裂效果, 高压电脉冲水压致裂效果明显优于单纯的水压致裂; 随着放电电压的增加, 产生的裂纹数量增加, 长度变长, 宽度变宽。说明随着放电电压的增加, 水中脉冲压力更大, 煤样更容易起裂, 裂缝尖端拉应力更集中、数值更大, 裂缝变得越宽, 数量越多。同时不同放电电压情况下, 裂纹的起裂方位基本相同, 起裂方式基本都是对称起裂。

5 煤层致裂数值模拟

为了更好地研究高压电脉冲水压致裂裂隙的起裂、延展情况以及裂纹的应力分布情况, 进一步进行了数值模拟计算。

5.1 计算模型

采用 ABAQUS 有限元软件对高压电脉冲作用下煤层裂隙的起裂、延展情况以及裂纹的应力分布情况进行数值分析。计算模型如图 7 所示。计算模型的边界条件与试验模型的边界条件一致, 计算模型材料力学参数与试验材料的一致。在模型孔壁上预先设置了 4 条微小裂隙。裂纹长度分别为 5, 5, 8, 8 mm。钻孔正下方的裂隙编号为 1[#], 按顺时针旋转, 编号依次为 2[#], 3[#], 4[#]。裂纹的具体布置如图 8 所示。

5.2 计算结果分析

(1) 水压电脉冲作用下裂隙的起裂和扩展

图 9 和 10 分别给出了 3 MPa 静水压 + 5 kV 高压放电条件下和 3 MPa 静水压 + 10 kV 高压放电条件下裂隙的起裂位置和扩展方向。由图分析可以看

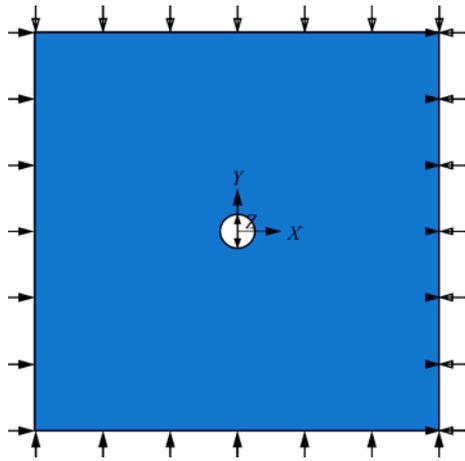


图 7 数值计算模型

Fig.7 Numerical calculation model

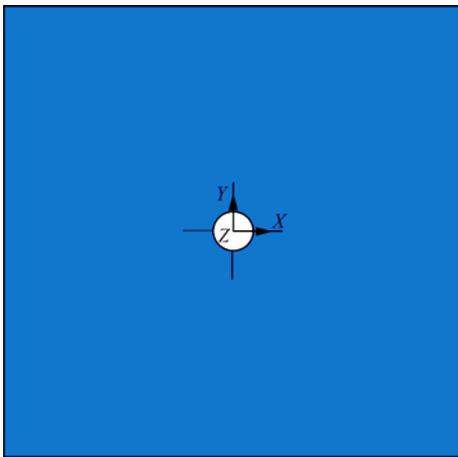
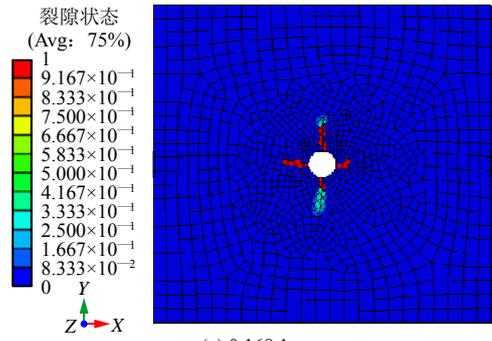
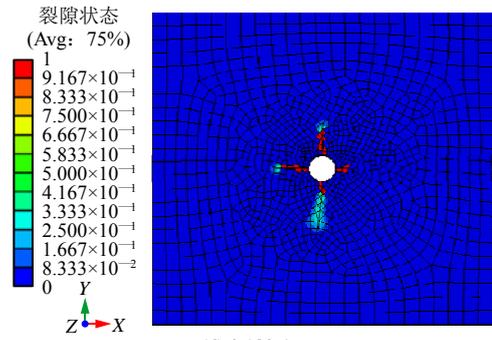


图 8 预设裂纹

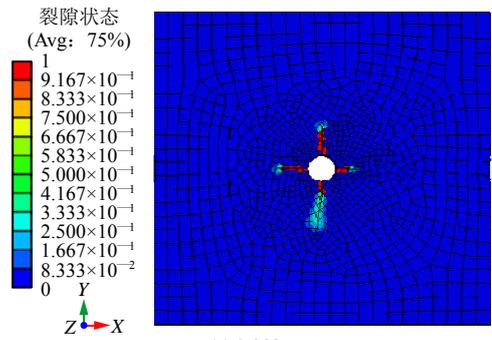
Fig.8 The pre-set crack



(c) 0.168 1 s



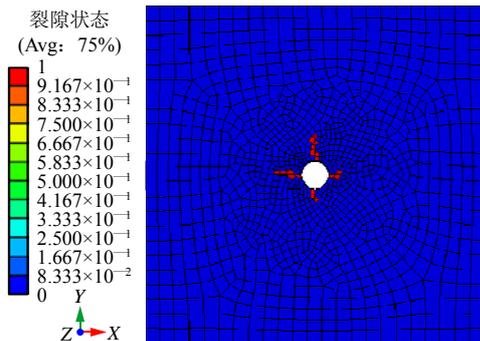
(d) 0.189 4 s



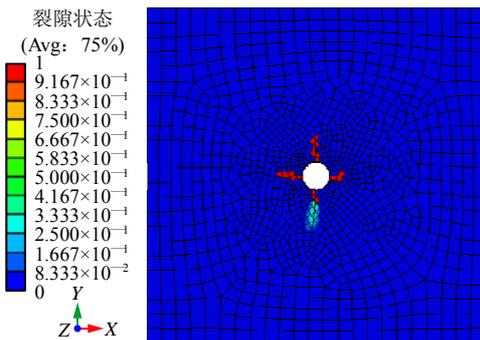
(e) 2.000 s

图 9 5 kV 水压电脉冲作用下裂隙的起裂和扩展

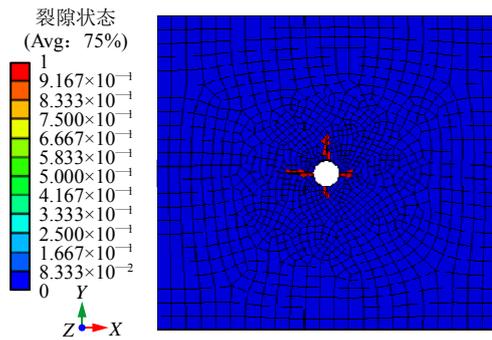
Fig.9 Crack initiation and extension under electric pulse of 5 kV



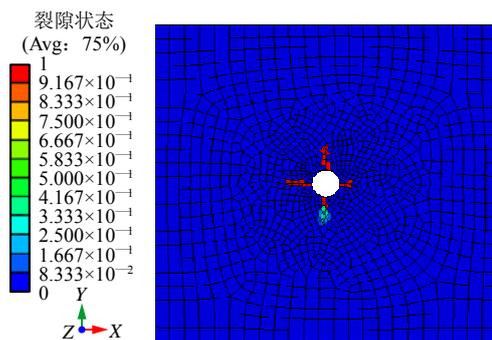
(a) 0.000 0 s



(b) 0.163 3 s



(a) 0.000 0 s



(b) 0.108 9 s

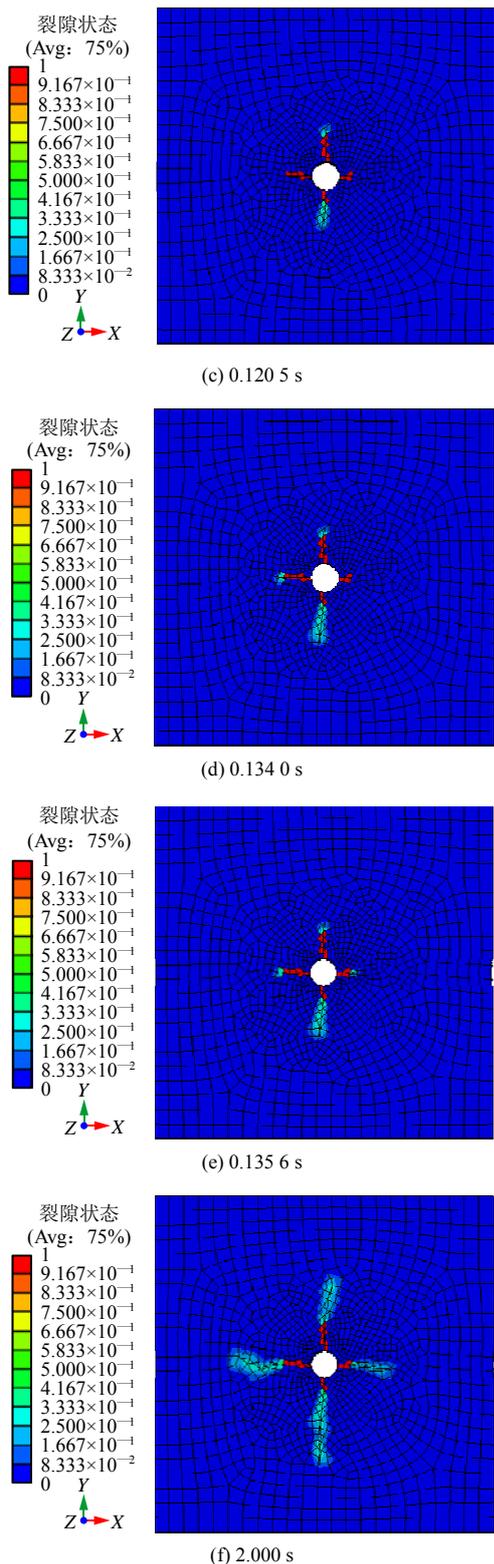


图 10 10 kV 水压电脉冲作用下裂隙的起裂和扩展

Fig.10 Crack initiation and extension under electric pulse of 10 kV

出，在不同的脉冲电压下裂隙起裂方位基本相同，首先从 1[#]预设裂隙开始起裂，之后是 3[#]裂隙，然后是 2[#]裂隙，最后是 4[#]裂隙。裂隙对称起裂，每条裂隙扩展长度不一，首先起裂的 1[#]裂隙扩展距离最长，

宽度最宽，而 4[#]裂隙最后起裂且发展距离最短。10 kV 电压相比较 5 kV 电压裂纹的起裂时间更早，起裂长度更长，宽度更宽，这与试验结果高度吻合。

(2) 水压电脉冲作用下裂隙周边的应力

由图 11, 12 可以看出，裂隙尖端存在拉应力集中现象，并且裂隙周边拉应力随着脉冲电压的增大而增大，当裂隙周边的脉冲荷载增大时，拉应力达到或超过裂隙尖端扩展的极限拉应力值，裂隙便会起裂、扩展、延伸。当施加的荷载衰减时，拉应力值在逐渐降低。从拉应力的变化趋势可以看出，高压放电电压越大，产生脉冲压力值必然增大，裂缝受到的拉应力越大，裂隙越容易起裂与扩展延伸。

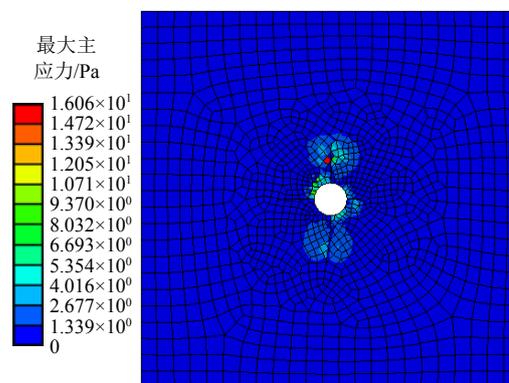


图 11 5 kV 电脉冲作用下裂隙周边应力

Fig.11 Stress distribution around crack under electric pulse of 5 kV

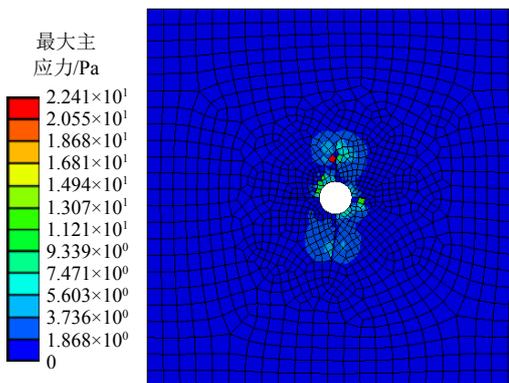


图 12 10 kV 电脉冲作用下裂隙周边应力

Fig.12 Stress distribution around crack under electric pulse of 10 kV

6 结 论

为了提高煤层气的抽采效率，基于高压电脉冲和水压致裂理论，通过试验和数值模拟对高压电脉冲水压致裂煤层这一新技术进行了研究，可以得出以下结论：

(1) 在单纯静水压力(3 MPa)作用下, 煤样基本上没有新生裂纹产生, 而在相同静水压力(3 MPa)下辅以高压电脉冲, 钻孔周围形成了非常明显的新生裂隙, 而且裂隙长度、宽度都很大, 说明了高压电脉冲水压致裂煤层方法有效, 技术可行, 而且其致裂效果比单纯静水压裂效果好。

(2) 在相同静水压力作用下, 10 kV 放电电压比 5 kV 放电电压裂纹的起裂时间更早, 裂纹数量更多, 开裂长度更长, 宽度更宽, 说明放电电压越高致裂效果越好。

(3) 从数值模拟结果可以看出, 在高压电脉冲水压力作用下, 裂隙尖端产生的拉应力达到或超过裂隙尖端扩展的极限拉应力值时, 裂隙便会扩展、延伸。

(4) 在相同静水压力作用下, 放电电压越高, 裂隙尖端产生的拉应力值越大, 裂隙越容易开裂, 延展越长, 宽度越宽, 煤层渗透性越好。

参考文献(References):

- [1] 韩金轩, 杨兆中, 李小刚, 等. 我国煤层气储层压裂现状及其展望[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2012, 14(3): 53 - 55.(HAN Jinxuan, YANG Zhaozhong, LI Xiaogang, et al. Present situation and perspectives of CBM of our country[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2012, 14(3): 53 - 55.(in Chinese))
- [2] 赵阳升, 杨 栋, 胡耀青, 等. 低渗透煤储煤层气开采有效技术途径的研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(5): 455 - 458.(ZHAO Yangsheng, YANG Dong, HU Yaoqing, et al. Study on the effective technology way for mining methane in low permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(5): 455 - 458.(in Chinese))
- [3] 翟 成, 林柏泉, 王 力. 我国煤矿井下煤层气抽采利用现状及问题[J]. 天然气工业, 2008, 28(7): 23 - 26.(ZHAI Cheng, LIN Boquan, WANG Li. Status and problems of drainage and utilization of down hole coal bed methane in coal mines in China[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(7): 23 - 26.(in Chinese))
- [4] 李学臣. 提高单一低透性煤层抽采效果的增透途径[J]. 煤矿安全, 2011, 42(4): 90 - 92.(LI Xuechen. The way to increase the permeability of single low permeability coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2011, 42(4): 90 - 92.(in Chinese))
- [5] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992: 178 - 180.(YU Qixiang. Mine gas control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1992: 178 - 180.(in Chinese))
- [6] 周声才, 李 栋, 张凤舞, 等. 煤层瓦斯抽采爆破卸压的钻孔布置优化分析及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 807 - 813.(ZHOU Shengcai, LI Dong, ZHANG Fengwu, et al. Optimization analysis of drilling layout based on blasting releasing pressure and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 807 - 813.(in Chinese))
- [7] 龚国民. 突出煤层穿层钻孔增透强化瓦斯抽采消突技术及效果考察[J]. 矿业安全与环保, 2015, 42(6): 83 - 86+89.(GONG Guomin. Study on outburst-elimination technology of enhanced gas drainage by permeability improvement with crossing holes in outburst seam and investigation of its effect[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2015, 42(6): 83 - 86+89.(in Chinese))
- [8] 涂 敏, 付宝杰. 低渗透性煤层卸压瓦斯抽采机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 433 - 436.(TU Min, FU Baojie. Extraction mechanism of relieved gas from low permeability seam[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2009, 26(4): 433 - 436.(in Chinese))
- [9] 申瑞臣, 闫立飞, 乔 磊, 等. 煤层气多分支井地质导向技术应用分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(5): 43 - 49.(SHEN Ruichen, YAN Lifei, QIAO Lei, et al. Application and analysis on geosteering technology of coal bed methane multi branch wells[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5): 43 - 49.(in Chinese))
- [10] 邓广哲, 王世斌, 黄炳香. 煤岩水压裂缝扩展行为特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3 489 - 3 493.(DENG Guangzhe, WANG Shibing, HUANG Bingxiang. Research on behavior character of crack development induced by hydraulic fracturing in coal-rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3 489 - 3 493.(in Chinese))
- [11] 倪冠华, 林柏泉, 翟 成, 等. 脉动水力压裂钻孔密封参数的测定及分析[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(2): 177 - 182.(NI Guanhua, LIN Baiquan, ZHAI Cheng, et al. Borehole sealed parameter measurement and analysis of pulsating hydraulic fracturing[J]. Journal of China University of Mining Technology, 2013, 42(2): 177 - 182.(in Chinese))
- [12] 翟 成, 李贤忠, 李全贵. 煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 1 996 - 2 001.(ZHAI Cheng, LI Xianzhong, LI Quanguai. Research and application of coal seam pulse hydraulic fracturing technology[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 1 996 - 2 001.(in Chinese))
- [13] 李志伟. 低渗透煤层气注热开采及其渗透规律研究[博士学位论文][D]. 太原: 太原理工大学, 2015.(LI Zhiwei. Study on injecting heat and seepage law in coalbed gas of low permeability coal seam[Ph. D. Thesis][D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.(in

- Chinese))
- [14] 梁卫国, 吴迪, 赵阳升. CO₂ 驱替煤层 CH₄ 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 665 - 673.(LIANG Weigu, WU Di, ZHAO Yangsheng. Experimental study of coalbeds methane replacement by carbon dioxide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 665 - 673.(in Chinese))
- [15] JESSEN K, TANG G, KOVSCEK A. Laboratory and simulation investigation of enhanced coalbed methane recovery by gas injection[J]. Transport in Porous Media, 2008, 73(2): 141 - 159.
- [16] 李芷, 贾长贵, 杨春和, 等. 页岩水力压裂水力裂缝与层理面扩展规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 12 - 20.(LI Zhi, JIA Changgui, YANG Chunhe, et al. Propagation of hydraulic fissures and bedding planes in hydraulic fracturing of shale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 12 - 20.(in Chinese))
- [17] 张国华, 魏光平, 侯凤才. 穿层钻孔起裂注水压力与起裂位置理论[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 52 - 55.(ZHANG Guohua, WEI Guangping, HOU Fengcai. Theory of start-split effusion stress and start split location about through coal delamination bore of hydraulic fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 52 - 55.(in Chinese))
- [18] 贾少华, 赵金昌, 尹志强, 等. 基于高压电脉冲煤体增透的水激波波前时间变化规律研究[J]. 太原理工大学学报, 2015, 46(6): 680 - 684.(JIA Shaohua, ZHAO Jinchang, YIN Zhiqiang, et al. Research on change laws of front time in water shock-wave based on pulsed high-voltage discharge in permeability enhancement in coal seams[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2015, 46(6): 680 - 684.(in Chinese))
- [19] 尹志强, 赵金昌, 贾少华, 等. 基于高压电脉冲的水激波加载特性的实验研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(6): 182 - 185.(YIN Zhiqiang, ZHAO Jinchang, JIA Shaohua, et al. Experimental study of water shock load characteristics based on high-voltage pulse discharge[J]. Coal Technology, 2016, 35(6): 182 - 185.(in Chinese))
- [20] 秦曾衍, 左公宁, 王永荣, 等. 高压强脉冲放电及其应用[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2000: 4 - 5.(QIN Cengyan, ZUO Gongning, WANG Yongrong, et al. High voltage pulsed discharge and its application[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2000: 4 - 5.(in Chinese))
- [21] 尤特金(苏). 液电效应[M]. 北京: 科学出版社, 1962: 9 - 10.(TPEHT ДЖИИ ЮКОКА. Hydro electric effect[M]. Beijing: Science Press, 1962: 9 - 10.(in Chinese))
- [22] 姚熊亮, 汪玉, 张阿漫. 水下爆炸气泡动力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2012: 1 - 2.(YAO Xiongliang, WANG Yu, ZHANG Aman. Bubble dynamics of underwater explosion[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2012: 1 - 2.(in Chinese))
- [23] 张阿漫, 姚熊亮, 李佳. 气泡群的动态物理特性研究[J]. 物理学报, 2008, 57(3): 1 672 - 1 682.(ZHANG Aman, YAO Xiongliang, LI Jia. The dynamics of bubbles[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(3): 1 672 - 1 682.(in Chinese))
- [24] ZONG Z, LAM K Y. The flexural response of a submarine pipeline to an underwater explosion bubble[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2000, 122(3): 194 - 199.
- [25] LIGHTHILL J. Waves in fluids[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 98 - 101.
- [26] HUANG B X, LIU C Y, FU J H, et al. Hydraulic fracturing after water pressure control blasting for increased fracturing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(6): 976 - 983.
- [27] LI N, HUANG J G, LEI K Z, et al. The characteristic of the bubble generated by underwater high-voltage discharge[J]. Journal of Electrostatics, 2011, 69(4): 291 - 295.