

# 水中脉冲放电压裂抽采煤层气机理与数值模拟研究

鲍先凯<sup>1,2</sup>, 曹嘉星<sup>1</sup>, 段东明<sup>1</sup>, 赵金昌<sup>2</sup>, 武晋文<sup>3</sup>

(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体煤层气的开采效率, 提出了水中脉冲放电压裂抽采煤层气技术, 研究了水中高压电脉冲放电机理和煤体裂隙断裂扩展机理, 并应用 RFPA-Dynamic 进行能量数值模拟计算。研究表明: 在相同静水压力作用下, 随着放电能量的增加, 煤体产生裂隙更多, 裂隙长度更长, 宽度更宽, 钻孔周围裂隙密度也更大。裂隙尖端应力随着加载时间和放电能量的增加而增加, 裂隙更容易扩展。研究结果可为煤层气的开采提供一定的理论依据。

**关键词:** 高压电脉冲; 水中放电; 裂隙; 断裂能量; RFPA-Dynamic

中图分类号: TE19

文献标识码: A

## Mechanism and numerical simulation of CBM extraction by pulsed discharge fracturing in water

Bao Xiankai<sup>1,2</sup>, Cao Jiaying<sup>1</sup>, Duan Dongming<sup>1</sup>, Zhao Jinchang<sup>2</sup> and Wu Jinwen<sup>3</sup>

(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 production efficiency of coal-bed methane with low permeability, we proposed the CBM fracturing and recovery technique with pulsed discharge in water, studied the mechanism of high-voltage electrical pulse discharge in water and the fracture mechanism of coal fractures, and calculated the numerical simulation of energy by RFPA-Dynamic. The results showed that under the same hydrostatic pressure, and with the increase of discharge energy, the fissures increased, the fissure length got longer, the width got wider, and the fissure density around the borehole got larger. The tip stress of the fissure increased with the loading time and the discharge energy, so that the fissures expanded more easily. The research results could provide certain theoretical basis for the exploitation of CBM.

**Key words:** high-voltage electrical pulse, discharge in water, crack, break energy, RFPA-Dynamic

煤层气作为一种不可再生资源, 储藏在煤层之中<sup>[1]</sup>, 是一种非常好的清洁能源。但是在低渗透性煤层中, 大部分煤层气以吸附状态存在, 开采受到很大的影响。因此, 在煤层气开采过程中, 如何增加煤层气的渗流通道和增加煤体透气性便成为了抽采工作的重中之重。赵阳升, 杨栋<sup>[2]</sup>提出了对低渗透性煤层气开采的有效途径是进行该煤层的水力割缝技术。

试验证明与钻孔排放相比, 水力割缝排放煤层气的排放速度和排放量都比较高。李守国<sup>[3]</sup>针对我国低渗透性煤体的现状, 提出了高压空气爆破致裂增透技术。该技术缩短了工作面的预抽时间, 加快了整个工作面的推进速度, 大幅度提高了煤层气的开采量。袁亮<sup>[4]</sup>提出了利用保护层开采卸压效应的井上、井下煤层气立体抽采技术。其他常见煤层气增透技

收稿日期: 2018-05-30。

第一作者简介: 鲍先凯(1974—), 男, 博士, 煤层气开发与利用。

基金项目: 内蒙古自然科学基金“基于高压电脉冲水压致裂的低渗透性煤层气解吸增透效果试验研究”(2016MS0511); 国家自然科学基金青年科学基金项目“岩石高温三轴压裂机理研究”(51504220); 山西省自然科学基金“静水压力作用下脉冲放电水激波不同速率动载组合致裂低渗透煤层机理研究”(201701D121132)。

术主要还有三维高压旋转水射流扩孔煤层增透技术<sup>[5]</sup>,保护层消突技术<sup>[6-7]</sup>,煤层注气、驱替技术<sup>[8-9]</sup>以及水力压裂技术<sup>[10-11]</sup>等。其中水力压裂技术是目前采用较为普遍的一种方法,其具体做法是在煤体钻孔中注入高压水,通过水的静压力使煤体产生裂隙,增加煤层的透气性,提高煤层气开采率。但是由于煤体具有质地柔软、泊松比高、易压缩等特点,在水力压裂技术开采煤层气过程中,容易造成孔隙闭合等问题<sup>[12]</sup>。

提出的水中高压脉冲压裂技术是在水压致裂技术的基础上,水中进行高压放电来产生脉冲荷载,利用脉冲荷载对煤体的破坏作用,在煤体表面与内部形成裂隙网<sup>[13]</sup>,达到增加煤体透气性的效果。从能量的角度出发,探讨了水中脉冲放电机理以及煤体裂隙扩展的断裂机理,并进行了数值模拟,分析了相同静水压力,不同放电电压条件下的煤样裂纹的起裂、发展以及应力分布情况。

## 1 水中脉冲放电机理分析

在水中放电的初期,电弧高温引起通道中压力升高,随即开始膨胀,在水中产生放电脉冲压力波,放电电极两端的电能首先转化为水激波的能量。在放电的后期,放电通道内会产生巨大的热量,这些热量会使液体发生汽化现象。由于汽化后压力突然上升,会在水中形成具有较大初始压力的气泡。由于气泡内外压力的不断变化,气泡会出现不规则脉动,直至气泡消失。

水中脉冲放电过程是一个能量注入与转化的过程,而能量注入的结果就是能够产生放电通道,当外加电极两端电压超过一定值时,由于等离子体中的高能电子和水分子发生碰撞,随着碰撞的产生也带来了一系列复杂的反应,产生击穿现象。在通道击穿后电容器储能向液中放电通道释放能量,产生水激波(冲击波)和脉动气泡,由此,完成电能向机械能的转化。大量的物理实验表明,冲击波能量占放电总能量的53%左右,气泡占放电总能量的47%左右<sup>[14]</sup>。

一次放电电能转化为水激波与脉动气泡的能量为:

$$E = \frac{CU^2}{2}\eta \quad (1)$$

式中: $E$ 为放电能量,J; $C$ 为电容器电容,F,此次数值

模拟, $C$ 取 $60 \times 10^{-6}$ F; $U$ 为放电电压,V; $\eta$ 为放电能量转化率,可取10%~20%<sup>[14-15]</sup>,文中取15%。

## 2 煤体裂隙扩展机理分析

水中脉冲放电后,电能的一部分以应变能的形式储存在煤体内部,与此同时,随着煤体裂隙表面积的增加,产生新表面也需要能量消耗,电能也需要提供这部分的表面能,其余部分转化为用来抵消塑性区的阻力的塑性应变能。用公式表示则为:

$$W = U_e + \Gamma + U_f \quad (2)$$

式中: $W$ 为外力所做的功,J; $U_e$ 为弹性应变能,J; $\Gamma$ 为表面能,J; $U_f$ 为塑性应变能(或塑性功),J。

### 2.1 弹性应变能

一般来讲,弹性变形是具有可逆性的,所以弹性势能在转化过程中也具有可逆性。在电脉冲水力压裂的前期,煤体由于发生了弹性变形,会将施加的电能转化为弹性势能,并将这部分弹性势能储存于受压煤体的内部。这些能量就是水力压裂裂隙起裂的源动力,可以用下式计算:

$$U_e = V_1 + V_2 = \frac{1}{2E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (3)$$

式中: $V_1$ 、 $V_2$ 为轴向、纵向体应变能,J; $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 为单元体的三向应力,Pa; $E$ 为弹性模量,MPa; $\mu$ 为泊松比; $U_e$ 为煤体弹性应变能,J。

从式(3)可以看出弹性应变能是存储于煤体内部的一种能量。

### 2.2 表面能

裂隙在扩展的过程中需要外部提供一个扩展动力,这个扩展动力记作 $\Gamma$ ,若煤体裂隙能够扩展,则需满足 $\Gamma \geq R$ , $R$ 为裂隙的扩展阻力。在裂隙扩展的过程中,若克服裂隙表面阻力所消耗的能量 $\Gamma$ 可用式(4)表示:

$$\Gamma = \frac{\partial U_d}{\partial \varepsilon_{ij}} = 2 \frac{1-\mu^2}{E} \pi a^2 \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^n \Delta P_r \frac{\partial (\Delta P_r)}{(\partial \varepsilon_{ij})_r} \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_{ij}$ 为总应变; $u_d$ 为煤体应变能,J; $E$ 为弹性模量; $\mu$ 为泊松比; $\Delta P_r$ 为第 $r$ 组裂隙的裂隙扩展的法向力,N; $\Delta P_r$ 为第 $r$ 组裂隙的裂隙扩展的切向力,N; $\sigma_{ij}$ 为总应力; $\Gamma$ 为表面能,J。

### 2.3 塑性应变能

在断裂过程中,一个阻碍裂隙扩展的重要因素便是裂隙尖端塑性区的存在,在相同的塑性区上,裂隙最容易扩展的方向就是到塑性区距离最短的方向<sup>[6]</sup>。依据塑性理论,在压裂煤体发生的变形超过了弹性极限时,煤体会发生塑性变形,在这个过程中要消耗的一定的塑性应变能,用下列公式表示为:

$$U_f = d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}} \quad (5)$$

式中:  $d\varepsilon_{ij}^p$  为塑性应变能, J;  $Q$  为塑性势函数;  $d\lambda$  为塑性流动因子。

由断裂机理分析可知,在水中脉冲放电压裂煤体过程中,若水激波能量以及脉动气泡能量之和  $E$  大于表面能,弹性应变能,塑性应变能之和  $W$  时,煤体就会发生起裂,裂隙延伸。为了验证理论的正确性,进行了煤样压裂的数值模拟计算。

## 3 煤体破裂过程的数值模拟

### 3.1 数值模型的建立

应用 RFPA-Dynamic 软件建立 300 mm×300 mm 数值模型来分析不同放电能量下煤体裂纹的起裂、发生、发展过程,模型中心有一直径为 26 mm 的圆形钻孔。整个数值模型划分为 28 900 个网格单元,其中  $X, Y$  方向各 170 个网格(图 1)。模拟地层应力,边界上下分别施加 4 MPa、3 MPa 地应力。钻孔内保持 3

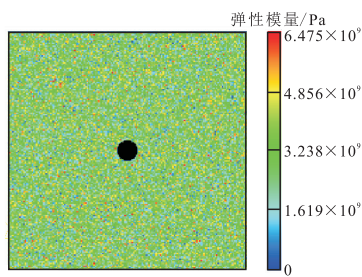


图1 数值模型网格单元

Fig. 1 Numerical model grid unit

MPa 静水压力不变,分别在钻孔内进行 2 kV, 4 kV, 6 kV 的高压放电(图 2)。模型材料的基本参数见表 1。

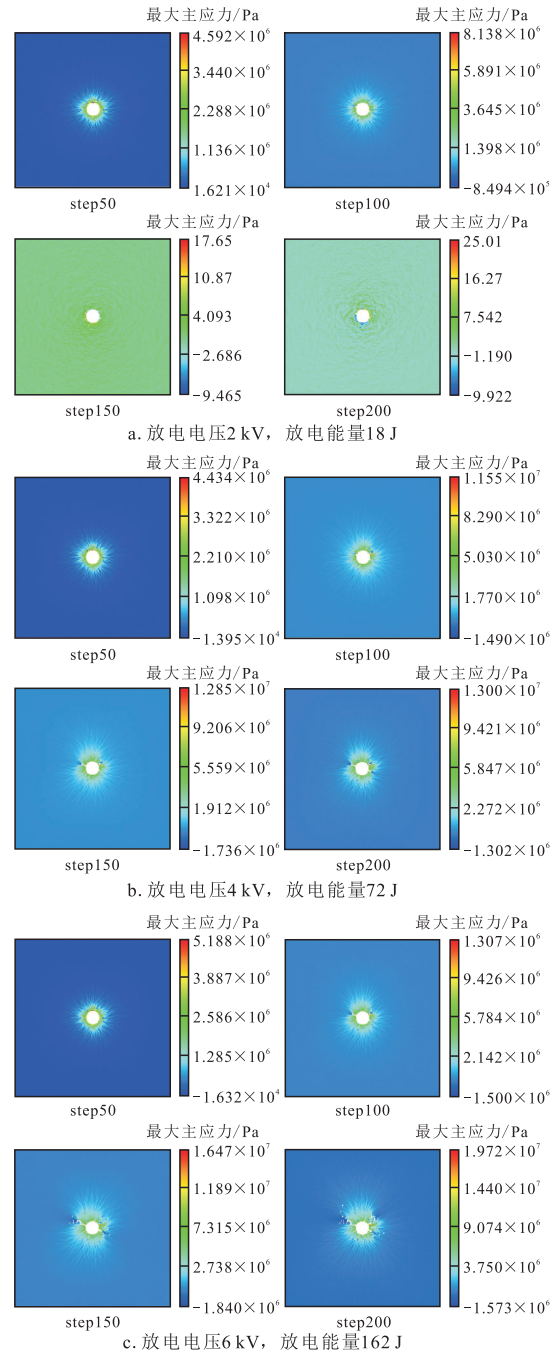


图2 放电电压 2 kV, 放电能量 18 J

Fig. 2 Discharge voltage is 2 kV, and discharge energy is 18 J

表 1 模型材料的力学性质参数

Table 1 Mechanical parameters of model materials

| 名称    | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 泊松比   | 弹性模量/MPa | 内摩擦角/(°) | 抗压强度/MPa | 抗拉强度/MPa |
|-------|--------------------------|-------|----------|----------|----------|----------|
| 平均值   | 1 450                    | 0.201 | 3 400    | 32.85    | 18.69    | 0.953    |
| 均质度系数 | 100                      | 100   | 3        |          | 3        | 3        |

### 3.2 数值模拟结果分析

由图2的模拟结果可以看到保持3 MPa静水压力不变的情况下,放电电压2 kV(18 J)时(图2a),钻孔周围有五个微小裂隙的产生,没有连贯的长裂纹且没有发生扩展延伸等现象;当放电电压增加到4 kV(72 J)(图2b),裂隙仅发生在钻孔周围1/3范围内,裂隙明显扩展,且延伸出三条连贯的长裂纹,两条短裂纹;当放电电压增加到6 kV(162 J)(图2c),裂隙发生在钻孔周围1/2范围内且相同时间内钻孔扩展四条长裂纹,两条短裂纹,裂隙密度扩展更加密集。这说明在静水压不变的情况下,随着放电能量的增加,煤体裂隙数量增加明显,裂隙扩展度更大,长度更长,钻孔周围裂隙更加密集,裂隙密度增加幅度较大。随着放电能量的增加,钻孔侧壁出现裂隙的范围也逐渐变大。

随着加载时间的增加,能明显看到裂隙的动态变化,说明水中放电产生的水激波和脉动气泡反复作用于裂隙尖端,促进了裂隙的进一步扩展。另外随着加载时间和放电能量的增加,裂隙尖端的最大应力呈增长趋势,有利于裂隙的进一步扩展。

## 4 结论

1) 通过理论分析得出煤体表面能,塑性应变能,弹性应变能的计算公式,若水激波和脉动气泡所携带的能量 $E$ 大于表面能,弹性应变能,塑性应变能之和 $W$ 时,煤体裂隙将出现起裂、延伸。

2) 通过数值模拟分析,放电能量的大小直接影响煤体起裂程度与延伸程度,放电能量越大煤体钻孔周边起裂范围越大,裂隙长度越长,开裂度越大,裂隙越密集,为水力压裂煤层气的开采提供了理论分析模型。

3) 冲击荷载反复作用于裂隙尖端,尖端应力随

着加载时间和放电能量的增加而增加,裂隙更容易扩展。

#### 参考文献

- [1] 严绪朝,郝鸿毅.我国的煤层气及其开发利用现状和前景[J].石油科技论坛,2007,26(5):4-9.
- [2] 赵阳升,杨栋,胡耀青,等.低渗透煤储层煤层气开采有效技术途径的研究[J].煤炭学报,2001,26(5):455-458.
- [3] 李守国.高压空气爆破煤层增透关键技术与装备研发[J].煤炭科学技术,2015,43(2):92-95.
- [4] 袁亮,薛俊华,张农,等.煤层气抽采和煤与瓦斯共采关键技术现状与展望[J].煤炭科学技术,2013,41(09):6-11+17.
- [5] 李守山,姜文忠,贾宝山,等.低透气性煤层致裂增透技术应用与展望[J].煤炭科学技术,2017,45(6):35-42.
- [6] 袁亮,薛生.煤层瓦斯含量法确定保护层开采消突范围的技术及应用[J].煤炭学报,2014,39(9):1786-1791.
- [7] 张宏伟,付兴,霍丙杰,等.低透煤层保护层开采卸压效果试验[J].安全与环境学报,2017,17(6):2134-2139.
- [8] 赵振保.变频脉冲式煤层注水技术研究[J].采矿与安全工程学报,2008,25(4):486-489.
- [9] 汪虎,武光辉,耶毅刚,等.煤层注水技术在高瓦斯矿井的应用展望[J].科技创新与应用,2015,5(7):58.
- [10] 赵阳升,杨栋,胡耀青,等.低渗透煤储层煤层气开采有效技术途径的研究[J].煤炭学报,2001,26(5):455-458.
- [11] 王兆丰,刘军.我国煤矿瓦斯抽放存在的问题及对策探讨[J].煤矿安全,2005,36(3):241-246.
- [12] 李同林.水压致裂煤层裂缝发育特点的研究[J].地球科学,1994,19(4):537-545.
- [13] 鲍先凯,杨东伟,段东明,等.高压电脉冲水力压裂法煤层气增透的试验与数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2017,36(10):2415-2423.
- [14] 张阿漫,汪玉,闻雪友,等.水下爆炸气泡动态特性研究综述[J].船舶力学,2009,13(5):828-840.
- [15] 李恒乐.煤岩电脉冲应力波致裂增渗行为与机理[D].徐州:中国矿业大学,2015.
- [16] 尹双增.探讨一种新的复合型断裂判据——塑性区最短距离 $r_{\min}$ 判据[J].应用数学和力学,1985,6(6):507-518.

(编辑 常燕)