

低渗透性煤体电脉冲水压致裂效果及规律研究

鲍先凯^{1,2}, 段东明¹, 曹嘉星¹, 武晋文³, 赵金昌²

(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: 为了揭示电脉冲水压致裂技术对低渗透性煤体裂纹的作用效果和规律, 基于液电效应原理, 进行了高压电脉冲水压致裂理论分析和室内实验。共制作了3个试件, 在3 MPa静水压力不变的情况下, 分别施加不同的电压(9 kV、11 kV、13 kV), 利用超声波无损检测技术分别对实验前后的煤样进行扫描, 分析煤样内部裂纹的分布和扩展情况, 建立数值模型分析实验条件下裂纹的扩展规律和周边应力。结果表明: 超声波首波声时的变化能够很好的反映出实验前后煤体试件裂纹的变化情况; 单纯的3 MPa静水压力产生裂纹效果甚微; 随着水中放电电压的增加, 试件内部新生裂纹逐渐增多, 裂纹密度增大, 裂隙区域逐渐从中央钻孔向试件边缘扩展, 煤体产生裂纹效果明显; 在加载过程中, 应力最大值逐渐增大, 并随着裂纹的扩展而发生转移。

关键词: 高压电脉冲; 超声波无损检测; 液电效应; 裂纹

中图分类号: TE122

文献标识码: A

Study on effect and law of electric pulse hydraulic fracturing of low permeability coal

Bao Xiankai^{1,2}, Duan Dongming¹, Cao Jiaying¹, Wu Jinwen³ and Zhao Jinchang²

(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 reveal the effect and rule of hydraulic fracturing by high voltage electric pulse on coal crack, the analysis and the experiment about high voltage electrical hydraulic fracturing was carried out based on the principle of electro-hydraulic effect. Then three specimens were made. In the case of constant hydrostatic pressure at 3 MPa, different voltages (9 kV, 11 kV and 13 kV) were applied. The coal samples before and after the experiment were respectively scanned by ultrasonic nondestructive testing techniques to analyze the distribution and expansion of the coal internal cracks, and establish the numerical model to analyze the crack propagation rule and the surrounding stress distribution under experimental conditions. The results showed that the changes of the head ultrasonic wave's time could reflect the change of the crack in the coal sample before and after the experiment. The effect of the pure hydrostatic pressure at 3 MPa on the crack was very slight. While with the increase of the discharge voltage in the water, the new cracks inside the specimen and the density of cracks increased, and the fissure area extended from the central drilling to the edge of the test piece, coal crack effect was obvious. During the loading process, the maximum stress increased gradually and changed with the crack propagation.

Key words: high voltage electric pulse, ultrasonic nondestructive testing, electro-hydraulic effect, crack

煤层气具有热值高、储量大等特点, 是一种既清洁又经济的新能源, 现已引起越来越多国家的关注和重视。我国煤层气资源丰富, 约有(30 ~ 55) ×

10¹² m³煤层气储量, 煤层气储量居世界第三, 仅次于美国和加拿大, 开发潜力巨大^[1]。但是, 不容忽视的是我国的煤层气渗透率低, 致使煤层气的开采难度

收稿日期: 2018-03-16。

第一作者简介: 鲍先凯(1974—), 男, 在读博士, 副教授, 煤层气开采及利用方面的研究。

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)。

大,开采工作难以实施,开采率低。目前,通过增加煤体的通透性来提高煤层气的产量是业界的一个共识。所以,如何增加煤体的裂纹数量和开裂范围,疏通煤层气的渗流通道,从而促进煤层气排出是煤层气开采的主要研究内容。

为提高低渗透煤层气的开采率,国内外很多学者也先后采用了多种技术方法,如定向羽状水平井开采技术^[2-4]、注汽驱替技术^[5-6]、水压致裂技术^[7-8]、爆破卸压技术^[9]等。上述方法都在一定程度上提高了煤层气的开采率,取得了一定的实际效果,促进了我国煤层气开采事业的发展。但是我国矿井事故依然频繁发生,且大多数事故发生在已经采取了煤层气抽放措施的矿井中。由此表明,现有煤层气的开采工艺不能适应我国低渗透煤层气的开采,因此需要进一步研究新的技术来提高我国低渗透煤层气的开采率。

受液电效应在其他领域应用的启发^[10-12],利用液电效应提高煤体裂纹的数量和贯通程度是提高煤层气开采率的新思路。因此,本文在常规水力压裂技术的基础上提出了高压电脉冲水压致裂技术,并进行了实验。用超声波无损检测技术对实验前后试件裂纹的分布、扩展、发育情况进行了检测;利用数值模拟软件进一步研究了裂纹的断裂、发展情况以及裂纹周边的应力分布情况。

1 电脉冲水压致裂技术及超声波无损检测原理

1.1 电脉冲水压致裂技术原理

电脉冲水压致裂技术由静水压力压裂技术发展而来,在静水压的基础上增加了水中高压放电环节,利用高压放电产生的冲击波和脉动气泡所携带的能量使煤体产生裂纹。20世纪50年代,苏联学者 Yutkin^[13]等,将液电效应应用于工业生产中,且取得了较好的效果,液电效应的原理逐渐被人们所了解,液电效应在各行业的应用也逐渐增多。

在水中进行高压脉冲放电瞬间,会在两个电极之间产生高能等离子体放电通道,其能量在短时间(μs)内迅速释放,并产生水激波和气泡。

产生的水激波能量为:

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

气泡能量为:

$$E_B = K_2 Q/T_3 \quad (2)$$

式中: K_1 、 K_2 为经验系数, K_1 一般取4; S 为电极到压力传感器的距离,m; ρ 为水密度, g/cm^3 ; Q 为放电电能,J; c 为水中声速,m/s; $P_s(t)$ 为冲击波压力与时间的函数,MPa; τ 为冲击波时间常数; T_3 为气泡脉动周期,s。

$$P(t) = \begin{cases} P_r & t < t_1 \\ P_r + P_a \left(1 - \frac{t-t_1}{t_2-t_1}\right) & t_1 < t < t_2 \\ P_r & t_2 < t \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_r 为水激波余压,对应于本次试验所施加的静水压力,取3 MPa; P_a 为相对压力幅值,MPa; t_1 、 t_2 为脉冲初始和终止时间,s。

由以上分析可知,作用于煤体的外力包含静水压力、水激波能量和气泡能量三部分。在静水压力的作用下,煤体中原始存在的裂纹已经有了扩展的趋势,随后水中高压放电所产生的水激波在很短的时间内强作用于煤体,同时高压放电致使电极附近的水体汽化,在水中形成气泡,气泡脉动携带巨大的能量对煤体进行再次加载,致使煤体应力进一步增加。当作用于煤体的应力达到煤体强度极限时,煤体中裂纹开始扩展、发育。与静水压力压裂煤体不同,动荷载作用下由于惯性效应^[14]裂纹的扩展更加容易、迅速,更有利于裂纹的成长发育,形成相互贯通的煤层气运输通道。

1.2 超声波无损检测原理

超声波属于弹性波,因而对煤体具有一定的穿透性,超声波在煤体中的传播过程中不断与煤体进行相互作用,接收波中所携带的各种信息能够反映煤体的相关力学性质,所以通过对接收波的分析就可以判断煤体的完整性。1928年研制出了第一台能够发射连续波的超声波检测仪,随后有人把超声波检测技术应用于金属探伤,直到40年代末50年代初,西方一些学者将超声波无损检测技术应用于混凝土强度、裂缝等方面的检测^[15]。超声波无损检测技术应用于煤体裂缝检测的历史虽不如混凝土质量检测长,但近年来亦有应用。

在线弹性断裂力学中,平面裂隙的密度参数定义为^[16]:

$$x = N\pi <a^2> \quad (4)$$

式中: N 为单位面积中所存在的裂隙数量,个; a 为裂

隙的半长度, m ; 角括号表示平均。

设煤体的弹性模量和泊松比为 E_0 、 V_0 , 裂隙密度参数为 x , 运用能量原理获得裂隙岩石等效弹性参数与裂隙密度的关系:

$$\begin{cases} \bar{E} = \frac{1-x}{1-V_0^2 x} E_0 \\ \bar{V} = \frac{1-x}{1-V_0^2 x} V_0 \end{cases} \quad (5)$$

设实验前煤体波速为 V_{pm} , 实验后的煤体波速为 V_{p0} , 则有:

$$\frac{V_{p0}}{V_{pm}} = \left[\frac{\bar{E}(1-\bar{V})(1+V_0)(1-2V_0)}{E_0(1-V_0)(1+\bar{V})(1-2\bar{V})(1-\varepsilon_v^\phi)} \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中: E_0 、 V_0 为实验前弹性模量和泊松比; \bar{E} 、 \bar{V} 为试验后煤体的等效弹性模量和泊松比; ε_v^ϕ 为岩石的孔隙率。

煤体是一种复杂的地质体, 超声波在其内部传播的过程中会产生透射、反射、散射等多种传播现象, 通过上式可知煤体中的裂隙密度将影响到实验前后超声波在煤体中的传播速度, 通过分析实验前后超声波在煤体中传播速度的变化就可判断煤体试件裂缝的数量和分布范围。

2 电脉冲水压致裂增透实验

2.1 原煤样的加工及实验试件的制作

本次实验所使用的原始煤样来自晋煤集团, 用切割机把煤样制成边长为 270 mm 的立方体试件。为了方便实验加载和尽量减少外力对试件的扰动, 在煤样表面浇筑一层 30 mm 厚混凝土, 并在煤样表面涂抹一层环氧树脂, 使两者更加紧密的黏结。浇筑过程按规范操作, 按时浇水养护试件。

试件拆除模具后, 在制作成功的试件中心部位钻一个直径为 26 mm 的注水孔, 为了减少钻孔对试件裂纹的影响, 钻孔过程中缓慢进行, 并不断浇水降温。考虑到试件的周边部位受人为因素的影响较多, 容易对后期的超声波检测产生影响。在试件的每个边缩进 25 mm 后开始画线, 线与线之间的距离为 50 mm, 最终以注水孔为中心组成“田”字型网格, 并标注出行与列, 横向最上面为第一行, 竖向最左侧为第一列, 以此类推, 并用坐标轴平面与数字编号进行不同检测点的区分(图1)。

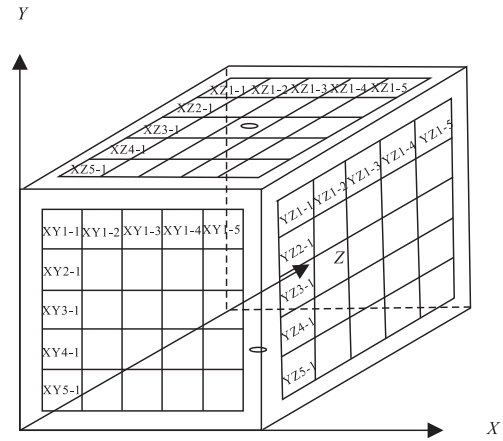


图1 超声波扫描区域划分

Fig. 1 Ultrasonic scanning area

2.2 试验方法

1) 实验前对打好孔的试件进行超声波检测, 测定试件的首波声时, 以确定试件内裂纹分布情况。

2) 将煤样吊入三轴压力室, 为模拟地层压力, 对煤样进行竖向(4 MPa)和水平向(3 MPa)加载。

3) 通过加压泵向试件的注水孔内注水, 直至水压达到 3 MPa, 停止加压, 且保持水压不变。

4) 分别设置煤样对应的加载电压, 见表1, 闭合放电开关, 开始放电。

5) 完成上述操作步骤后, 取出压力室中的煤样, 对其进行超声波检测。

本次对实验试件的超声波测量采用对测法, 即分别将发射器、接受换能器, 耦合于被测试件相互平行的两个表面, 为了保持测试的准确性, 须按要求使两个换能器的轴线位于同一直线上, 按照由左到右, 由上到下的规律, 逐点测量其首波声时等声学参数, 并做好记录。考虑到试件混凝土表面不是光滑平面, 为了保证换能器辐射面与试件测试表面有一个良好的耦合状态, 特在煤体试件上涂抹一层黄油。将实验前和试验后两次所得的首波声时对应做差, 计算实验试件的首波声时差, 对实验前后煤样的裂纹发展、变化规律进行分析, 研究煤体的致裂规律。

表1 实验试件加载情况

Table 1 Loading situation of experimental specimens

试件编号	放电电压/kV	静水压/MPa	采样频率/Hz
S-1	9	3	500
S-2	11	3	500
S-2	13	3	500

3 超声波检测数据分析

根据超声波检测原理可知:超声波检测是通过对接收波的传播时长、振幅等参数的变化进行分析来判定试件缺陷的位置及发育程度。即如果煤体内部裂纹较少,超声波穿过试件产生的绕射和反射少,可较快的到达接收端,首波声时短;反之首波声时变长。由于煤体试样XY面、YZ面、XZ面的首波声时规律类似,本文仅以煤体试样的XY面为例进行分析,对其它两个面不做多余阐述。

3.1 实验前首波声时数据分析

图2所示,通过对实验前试件的首波声时数据分析可得,所选取煤体试件的首波声时规律较为一致。即XY3行的数据值普遍比其它行要大;XY1行和XY5行的首波声时最小,且变化幅度也较小;试件的首波声时集中分布于70~110 μs的小区间内;试件XY面中部的首波声时普遍大于外边缘侧,但首波声时的变化量不大。综上所述,本次实验所选取的煤体试样内部分布有细小的裂纹,且煤体试样完整性比较相近;浇筑的混凝土与煤样接触紧密,试件制作符合实验要求。

3.2 实验后首波声时数据分析

由图3可知,从1号试件(9 kV)到3号试件(13 kV),首波声时比实验前都有所增加,并随着加载电压的提高,首波声时逐渐增大。1号试件首波声时增加幅度不大,且最大首波声时集中于钻孔周围;2号试件(11 kV)的首波声时与实验前相比有较大幅度的增加,分布区域更广;3号试件的首波声时比前面2个试件有更为明显的增加。由上图可以看到3号试件的XY3、XY4、XY5行的1号检测点数值明显增大,结合实验现场对3号试件进行试验后超声波检测时发现声波信号发生畸变。考虑到发生畸变的点位于试件边缘且实验前并没有波形畸变现象的发生,分析认为人为原因致使试件边缘部位产生损坏,致使首波声时过大。

由上述实验说明,随着试件加载电压的不断增大,试件首波声时越来越大,说明裂缝数量越来越多,裂纹的发展有向试件边缘扩展的趋势。表明水中高压放电,确实导致了试件裂纹的产生和发育,实验效果显著。

3.3 首波声时差数据分析

对图4进行分析可得,1号试件(9 kV)的裂纹仅

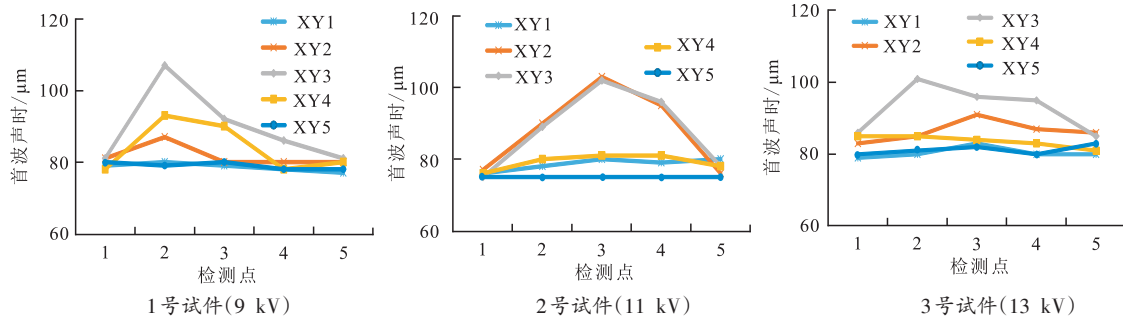


图2 实验前XY面首波声时

Fig. 2 Head wave's time of XY side before experiment

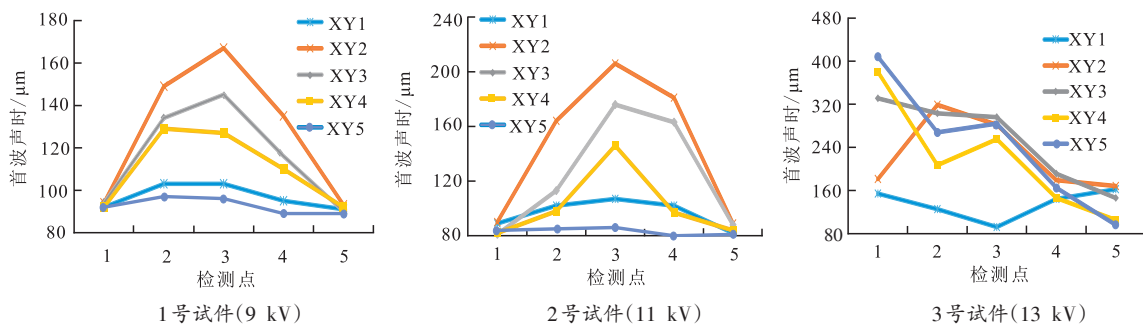


图3 实验后XY面首波声时

Fig. 3 Head wave's time of XY side after experiment

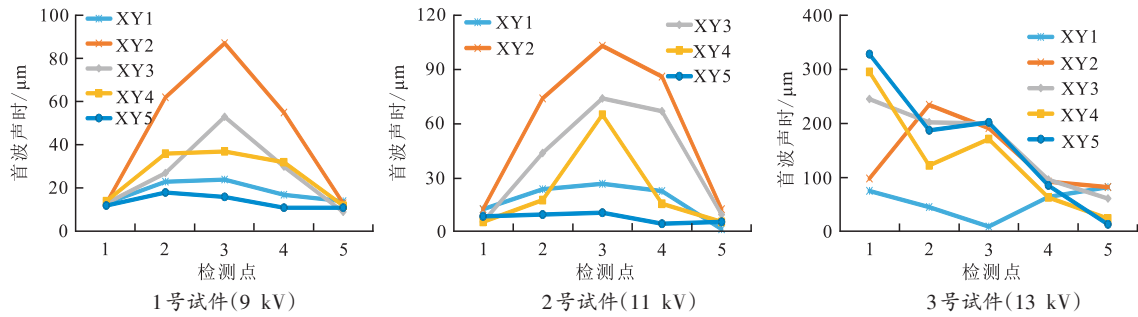


图4 XY面首波声时差

Fig. 4 Difference of head wave's time of XY side

出现在钻孔周边。与1号试件相比,2号试件(11 kV)的裂纹分布范围更大,从中心钻孔到试件边缘都有裂纹产生,随着加载电压的不断增大,液电效应的特性表现的越来越强,煤样中的裂纹发育程度越来越高,压裂效果十分显著,但并未形成贯通的裂缝。3号试件(13 kV)的首波声时差整体上比前2个试件有了更大的增加,表明裂纹分布的范围和程度都得到了增大。3号试件的XY3、XY4、XY5行的1号检测点受人为影响数值明显增大,参考价值不大。实验中发现3号试件的首波声时选取十分困难,由此表明,在3 MPa静水压力和13 kV高压放电条件下,煤样的破裂程度已经很高,达到了增加煤体通透性的目的。

综上所述可知,在3 MPa静水压力不变的情况下,随着加载电压的不断增大,煤样内部的裂隙数量逐渐增多,裂隙的分布范围越来越大,煤体的通透性得到了有效提高。结果表明,首波声时差能够很好地反映出实验前后煤体试件裂纹的变化情况;高压电脉冲水压致裂技术能够促进煤体裂缝的产生、发育,对提升我国低渗透煤层气的开采率有积极的借鉴意义。

4 电脉冲水压致裂数值模拟

为了更好地研究电脉冲水压致裂技术对煤体的致裂效果,在室内实验的基础上用RFPA软件建立300 mm×300 mm的数值计算模型,对实验条件下裂纹的扩展规律和周边应力分布进行模拟分析,模型材料力学参数见表2。模型中心钻孔直径为26 mm,本次模拟X轴和Y轴各划分170个网格。为了防止反射的应力波对裂纹扩展的影响,模型边界选用无反射边界。

模拟结果表明,单纯的3 MPa静水压力作用于煤体只能使煤体局部小区域内产生细小的裂纹,且裂纹

表2 模型材料力学参数

Table 2 Mechanical parameters of model materials

项目	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	压拉比 (C/T)
平均值	1 500	0.2	3 400	32	20
均质度系数	100	100	3		

无法发育成长,对提高煤体的通透性几乎没有作用。

由图5、图6、图7分析可知,3 MPa静水压力不变的情况下,9 kV的放电电压可以有效的使煤体产生裂纹,到150步时,可以明显看到已经有两条主裂纹产生;到200步时,已有3条主裂纹产生,并且裂纹的长度有所增长。当放电电压达到11 kV时,在相同的加载时间内,煤样产生的裂纹比9 kV放电电压条件下所产生的裂纹发育程度更高,裂纹扩展长度更长,扩展度更大,主裂纹周边已有微小的支裂纹产生。当放电电压达到13 kV时,煤样裂纹的发育程度已经很高,以主裂纹为骨干,支裂纹由点成线,互相交织,煤层气的渗流通道已经形成。

从主应力云图可以看到,不同放电电压条件下煤体内部的应力响应基本相同,在冲击荷载作用下煤体首先发生剪切破坏,产生微小裂纹,然后在裂纹尖端出现拉应力集中,集中应力不断驱使裂纹向前

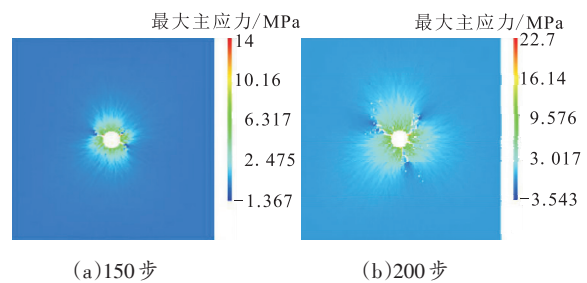


图5 3 MPa静水压力和9 kV放电电压

Fig. 5 Hydrostatic pressure at 3 MPa and discharge voltage of 9 kV

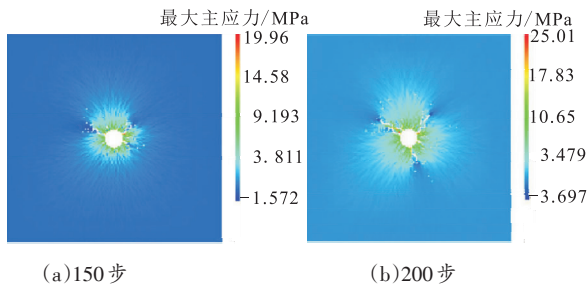


图6 3 MPa静水压力和11 kV放电电压

Fig.6 Hydrostatic pressure at 3 MPa and discharge voltage of 11 kV

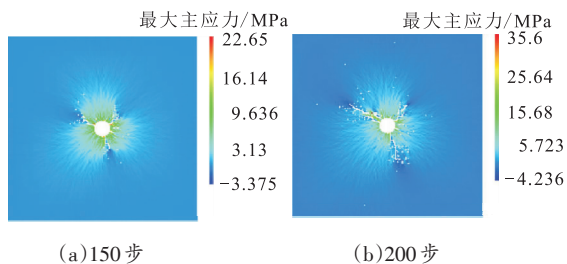


图7 3 MPa静水压力和13 kV放电电压

Fig.7 Hydrostatic pressure at 3 MPa and discharge voltage of 13 kV

扩展,形成主裂纹和分支裂纹。但是随着放电电压的增加,裂纹尖端处最大主应力也在增加;随着加载时间的增加,出现最大主应力的区域由孔壁处向外转移,有利于裂纹的进一步扩展。

从裂纹的形态上可以看出,随着加载时间和放电电压的增加,裂纹由微小裂纹逐渐转变为支裂纹、主干裂纹。同时主干裂纹又有支裂纹产生,主裂纹和分支裂纹、细小裂纹相互交错成网状结构,增加了煤体的通透性,可有效疏通煤层气的渗流。

5 结论

为了提高我国低渗透煤层气的抽采率,基于液电效应原理及超声波无损检测理论,通过实验和数值模拟的方式,揭示了高压电脉冲水压致裂技术对煤体裂纹的作用效果和规律,结论如下。

1) 高压电脉冲水压致裂技术,主要利用液电效应的冲击作用来提高煤体中裂纹数量和开裂程度,疏通煤层气的运输通道,提高煤层气的抽采率。

2) 单纯的静水压力,煤体裂纹起裂、扩展微小,压裂效果情况不佳。

3) 由超声波首波声时分析可得,随着放电电压的增加,试件内部新生裂纹数量不断增多,分布范围

不断扩大,贯通情况得到增强。

4) 在相同静水压作用下,随着放电电压的增加,钻孔周边裂纹数量、开展度增加明显,裂纹尖端主应力也在增加,裂纹由微小裂纹发展成分支裂纹、主干裂纹,并且交织成网,最终形成互相贯通的煤层气运输通道。

参考文献

- [1] 郭继圣,张宝优.我国煤层气(煤矿瓦斯)开发利用现状及展望[J].煤炭工程,2017,49(3):83-86.
- [2] 鲜保安,高德利,李安启,等.煤层气定向羽状水平井开采机理与应用分析[J].天然气工业,2005,25(1):114-116.
- [3] 杨恒林,汪伟英,田中兰.煤层气储层损害机理及应对措施[J].煤炭学报,2014,39(S1):158-163.
- [4] Clarkson C R, Rahmanian M, Kantzas A, et al. Relative permeability of CBM reservoirs: Controls on curve shape[C]// paper SPE-137404-MS presented at the Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, 19-21 October 2010, Calgary, Alberta, Canada.
- [5] 孙可明.低渗透煤层气开采与注气增产流固耦合理论及其应用[D].辽宁:辽宁工程技术大学,2004.
- [6] Yang T, Nie B, Yang D, et al. Experimental research on displacing coal bed methane with supercritical CO₂[J]. Safety Science, 2012, 50(4):899-902.
- [7] 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):1996-2001.
- [8] 林柏泉,孟杰,宁俊,等.含瓦斯煤体水力压裂动态变化特征研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(1):106-110.
- [9] 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.
- [10] 姜文理,刘钟阳,许东卫.液电效应催化臭氧氧化处理染料废水的研究[J].高电压技术,2007,33(2):145-149.
- [11] 张雷,邓琦林,周锦进.液电效应除垢机理分析与试验研究[J].大连理工大学学报,1998,38(2):87-91.
- [12] 李树杰,张毅.液电效应处理污水的实验研究[J].中国微生物学杂志,1996,8(1):63-64+52.
- [13] 尤特金.液电效应[M].北京:科学出版社,1962:9-10.
- [14] 张平,李宁,贺若兰,等.动载下两条断续预制裂隙贯通机制研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(6):1210-1217.
- [15] 张治泰,邱平.超声波在混凝土质量检测中的应用[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [16] Hu K X, Huang Y. Estimation of the elastic properties of fractured rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1993, 30(4):381-394.

(编辑 尹淑容)