

煤岩体水力压裂动态演化物理模拟试验研究

许江, 马天宇, 彭守建, 冯丹, 张超林, 武雪峰
(重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:为了掌握煤体水力压裂过程中压裂孔附近应力场、水压力场的时空演化规律,利用多场耦合煤层气开采物理模拟试验系统进行试验研究。试验结果表明:水力压裂全过程可以分为 4 个阶段,分别为应力积累阶段、微破裂发育阶段、裂缝失稳扩展阶段、破裂后阶段;在水力压裂过程中压裂孔径向应力会发生显著变化,而平行于压裂孔方向的应力变化不明显,且在裂缝扩展范围内距离压裂段越远的位置发生应力升高的时间越晚;水力压裂过程中水压力场的演化与裂缝的发育、扩展有着密切的联系,水压力等值线更倾向于沿着裂缝扩展的方向发展,且水压力等值线沿最大主应力方向的扩展速度明显大于沿中间主应力和最小主应力方向的扩展速度,表明水力压裂裂缝主要沿最大主应力方向扩展。

关键词:煤岩体;水力压裂;应力场;水压力场;时空演化

中图分类号:TD712;P618 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2017)06-0009-08

Experimental study on physical simulation experiment of hydraulic fracturing dynamic evolution in coal and rock mass

Xu Jiang, Ma Tianyu, Peng Shoujian, Feng Dan, Zhang Chaolin, Wu Xuefeng

(State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to master the time-space evolution law of the stress field and the hydraulic pressure field near the fracturing boreholes during the hydraulic fracturing process of the coal mass, the physical simulation test system of the multi-field coupling coal bed methane mining was applied to the experiment study. The test results showed that the full process of the hydraulic fracturing could be divided into four stages and they were stress accumulated stage, micro crack development stage, fracture stability lost and expansion stage and after the cracking stage. During the hydraulic fracturing process, the radial stress of the fractured borehole would be varied obviously and the stress variation parallel to the direction of the fractured borehole would not be obvious. Within the crack expanded scope, the location with a distance more far to the fractured section would be late to have a stress increased. During the hydraulic fracturing process, the hydraulic pressure field evolution would have a closed relationship to the crack development and expansion. The hydraulic pressure isoline would be inclined to be developed along the direction of the crack expansion. The expansion speed of the hydraulic pressure isoline along the maximum principal stress direction would be higher than the expansion speed along the direction of the central principal stress and minimum principal stress, which shows that the hydraulic fracturing crack is mainly along the maximum principal stress direction.

Key words: coal and rock mass; hydraulic fracturing; stress field; hydraulic pressure field; time-space evolution

0 引 言

我国煤层气资源丰富,据新一轮全国煤层气资源评价显示^[1],中国 1 500~3 000 m 埋深的煤层气地质资源量约为 $30.37 \times 10^{12} \text{ m}^3$,为 1 500 m 以浅煤

层气资源量的 2 倍,这是中国煤层气产业规模性发展的重要资源基础。水力压裂技术最初作为油气井增产的一项重要技术措施,如今广泛应用于煤层气的开发过程及煤矿井下瓦斯抽采过程中^[2]。事实证明^[3-4],水力压裂技术对煤层气资源的高效开采,

收稿日期:2016-11-19;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2017.06.002

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05044);国家自然科学基金资助项目(51474040,51304255,51434003)

作者简介:许江(1960—),男,湖南永兴人,教授,博士。E-mail:jiangxu@cqu.edu.cn

引用格式:许江,马天宇,彭守建,等.煤岩体水力压裂动态演化物理模拟试验研究[J].煤炭科学技术,2017,45(6):9-16,42.

Xu Jiang, Ma Tianyu, Peng Shoujian, et al. Experimental study on physical simulation experiment of hydraulic fracturing dynamic evolution in coal and rock mass[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 9-16, 42.

煤矿井下瓦斯的有效抽采,保护矿井安全生产起到了重要的作用。

自美国首次水力压裂试验成功以来^[5],众多专家学者围绕水力压裂裂缝的起裂、延伸机理和裂缝扩展规律等做了大量的研究工作。杜春志等^[6]从理论上分析了水力压裂作用下裂缝扩展的力学条件并利用数值软件成功地模拟了煤层裂缝的扩展延伸过程;林柏泉等^[7]为改进现有卸压增透技术提出了高压脉动水力压裂技术,现场检验证明效果显著;张羽等^[8]采用真三维水力压裂物理模拟试验对渐进角、水平主应力差及天然裂隙和割理等影响煤岩水力裂缝扩展的重要因素进行了研究并提出天然裂隙、割理及水平应力差系数是导致裂缝扩展规律复杂多样化的重要因素;邓广哲等^[9]通过对水力裂缝的形成、扩展与煤体渗透性改变水压作用的关系进行了试验研究,建立了起始渗透压力和最大破坏压力与煤样裂缝扩展变化过程的对应关系,研究了水压裂缝破坏煤体结构的力学机制;唐书恒等^[10]采用数值模拟的方法求解出了不同地应力条件下井壁处的破裂压力,分析了地应力对水力压裂起裂压力、起裂位置的影响。在水力压裂裂缝起裂及延伸机理方面,李杭州等^[11]对水压力作用下煤体裂纹尖端损伤局部化、裂纹扩展的基本条件及裂纹扩展的方向进行了理论分析和探讨,研究发现裂纹在扩展初期取决于最大切向拉应力,当达到一定长度时将取决于远场应力;阳友奎等^[12]在理论上分析得出了孔壁处初始破裂模式,依据不同地应力状态和岩石的物理学特性表现为拉伸或者剪切破坏。刘建军等^[13]通过建立三维数学模型而研究得出孔壁岩石水力压裂可能的模式有3种,即拉伸破裂、剪切破裂和先拉伸破裂后剪切破裂。张国华等^[14]以孔壁拉伸破裂理论为基础,推导出水力压裂钻孔起裂方程,并通过算例分析得出起裂面的发展会受到起裂位置的影响。

目前,关于水力压裂的研究大多都集中在地应力、天然割理等因素对水力裂缝生成、扩展的影响。水力压裂作为一项重要的防治煤与瓦斯突出水力化措施,在增加煤层渗透性和改善瓦斯运移通道方面效果显著,但同时由于高压水对煤层瓦斯的封堵作用会使得部分游离态瓦斯转化为吸附态,这样又对瓦斯抽采产生了难以避免的负面影响^[15-17]。所以开展对水力压裂过程中水压力场的演化规律研究具有重大意义。笔者以实验室物理模拟试验研究为基

础,对水力压裂过程中压裂孔附近地应力场及水压力场的时空演化规律进行了研究。

1 试验

1.1 试验设备

试验依托煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室(重庆大学)研发的多场耦合煤层气开采物理模拟试验系统^[18],主要包括主体承载支架、试验箱体、压裂及开采系统、伺服加载系统和数据控制和采集系统等。试件箱体从上、右和后三向设计有导向法兰套和压杆,以实现试件箱体内部煤岩体的三向应力加载,如图1所示;试验系统在试件箱体左壁均匀布置了3排共54个传感器连接通道,用于采集试件箱体内部不同点的水压力、温度等信息,且布设在试件中的各传感器通过线路与MaxTest-coal煤岩测控系统连接,以实时显示并记录传感器示值的变化;其试验用水泵为3DS-10-20/25-20型脉冲式高压水泵(图2)。



图1 多场耦合煤层气开采物理模拟试验系统

Fig. 1 Multi-field coupling test system for coalbed methane (CBM) exploitation



图2 试验用水泵

Fig. 2 Water pump used in the experiment

根据试验设备条件,拟在试件内部布置37个水压力传感器用于监测分析水力压裂过程试件中裂缝的发育、延伸及水压力场的演化。为方便分析不同测点,以试件箱体内部左下角顶点为原点建立空间直角坐标系;将垂直于Z轴且包含传感器测点的面定义为断面,从原点位置向Z轴正方向依次为第4断面到第1断面;将垂直于X轴且包含传感器测点的面定义为层面,从原点位置向X轴正方向依次为

第5层面至第1层面,其中第3层面为主层面;将垂直于Y轴且包含传感器测点的面定义为纵面,从原点位置向Y轴正方向依次为第5纵面至第1纵面,其中第3纵面为主纵面。试验共布置水压力传感器37个,其中36个布置在箱体内部,1个布置在箱体外部的进水口处且与水泵连接用于监测水泵水压力。传感器布置如图3a所示,每个断面内水压力传感器编号从上到下、从左到右依次增加,其中第1断面从上到下、从左到右水压力传感器编号为 $P_1—P_9$,以此类推,至第4断面水压力传感器编号为 $P_{28}—P_{36}$,箱体外部进水口处水压力传感器记为P水泵。压裂孔平行于Z轴,且压裂孔通过进水口与水泵连接。压裂段长100 mm,以第4断面为中心,平行Z轴布置,如图3b所示。

方向上均由4个压头进行加载。

1.3 试验准备

试验所用试样采用模具成型制作,利用水泥和石膏作为胶结材料,碎煤作为骨料,相似材料质量比例为煤粉:水泥:石膏=1:2:1,其中,煤粉的粒径为380~830 μm。通过取心测试相似材料的力学参数,测试结果为:单轴抗压强度5.38 MPa,弹性模量0.78 GPa,泊松比0.25,普氏系数0.82。

成型压裂试件的模具采用木板制作而成,尺寸为1000 mm×310 mm×310 mm。试件静置、养护30 d后脱模进行试验。将准备好的试验试样吊装进试验箱体并调整位置至合适,之后将与试件相同配比的相似材料灌入箱体与试件的空隙中,直至空隙被完全填满。干燥2 d后盖上箱体盖板开始试验。

2 试验结果及分析

2.1 水压力曲线分析

图4为水力压裂过程中水泵水压力 P_s 随时间 t 变化曲线,由图4可见, P_s 曲线波动较为剧烈,主要由于水力压裂所采用的水泵为脉冲式水泵,为便于区分、分析水力压裂各阶段对 P_s 曲线进行拟合。第10 s打开进水口阀门后,压裂液迅速涌入压裂孔,在极短的时间内将压裂段充满,进而造成压裂段内水压力的升高。从第10 s开始, P_s 迅速攀升,在第18 s左右达到起裂压力,约2.0 MPa,而后 P_s 有一定程度的降低。在此后20 s左右的时间内, P_s 保持较为平稳波动,这说明裂缝在试件内部不断地扩展、延伸。在第40 s左右时,裂缝扩展至试件的边缘并形成宏观主裂缝, P_s 突然降低并迅速跌落,压裂液从试验箱体中流出而造成 P_s 较大幅度的下降。在第50 s左右关停水泵,结束压裂作业。

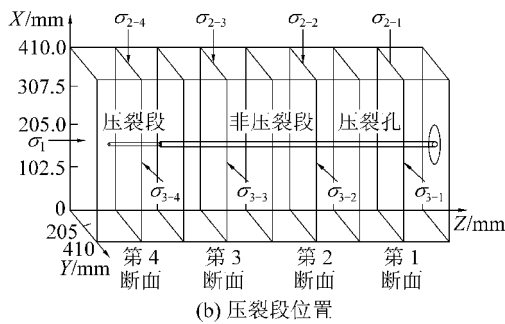
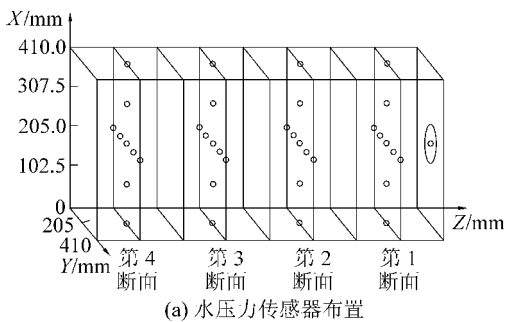


图3 水压力传感器布置与压裂段位置示意

Fig. 3 Arrangement of pressure sensor and the position of hydraulic fracturing

1.2 试验方案

根据以往试验经验,并结合试验所用相似材料的物理力学性质,试验采用地应力水平为最大主应力 σ_1 、中间主应力 σ_2 和最小主应力 σ_3 ,取值分别为2.2、0.9、0.7 MPa。其中 σ_1 平行于Z轴方向; σ_2 平行于X轴方向,且沿Z轴正方向依次为 σ_{2-4} 至 σ_{2-1} ; σ_3 平行于Y轴方向,且沿Z轴正方向依次为 σ_{3-4} 至 σ_{3-1} 。试验所用多场耦合煤矿动力灾害大型物理模拟试验系统中的伺服加载系统在X轴方向和Y轴

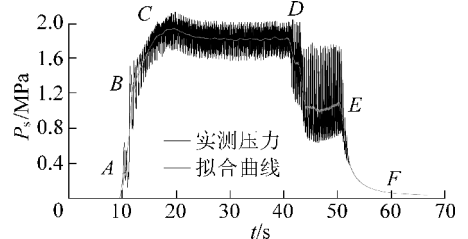


图4 水泵水压力曲线

Fig. 4 Pressure curve of water pump

如图4所示,将 P_s 数据经过光滑拟合处理后得到 P_s 拟合曲线。该水压力曲线可分为以下4个阶段:AB段对应时间为第10—12 s,此阶段 P_s 在很短的时间内迅速攀升,曲线斜率较大且 P_s 没有较大波动;BC

段对应时间为第13—19 s,此阶段 P_s 继续升高,但其升高速率较AB段有较为明显降低且 P_s 开始产生较大幅度的波动,这说明随着 P_s 的升高,试件中开始产生了一系列的微小裂隙,裂隙的每一次破裂而后延伸都会造成 P_s 一定幅度的波动;CD段对应时间为第20—40 s,此阶段中C点为起裂点, P_s 在C点达到起裂压力之后有一定幅度的降低但降低幅度不大,这是由于地应力水平和相似材料的物理力学性质造成的,而后 P_s 保持相对稳定;DF段对应时间为第40—60 s,其中D点为破裂点,在D点裂隙贯通并形成宏观主裂缝,主裂缝贯穿至试件边缘造成 P_s 大幅度降低,E点为水泵停止工作时刻点。

2.2 水力压裂过程中煤体应力状态演化规律

如图5所示,在水力压裂过程中,平行于压裂孔轴线的最大主应力 σ_1 始终未发生较为明显的变化,而处于压裂孔径向上的中间主应力 σ_2 和最小主应

力应力 σ_3 则随着 P_s 的变化而呈现出较为明显的变化。为对比分析水力压裂过程中沿裂缝扩展方向(σ_1 方向)煤体中应力演化规律,分别将图5b和图5c横坐标轴取为第10—26 s,得到应力状态演化规律局部图,如图5b和5c所示。从图中可以看出,在压裂液灌入压裂孔之后,处于压裂段的 σ_{2-4} 、 σ_{3-4} 最先表现出升高的趋势,这是由于压裂段受到压裂液对压裂孔孔壁的膨胀作用最为强烈,随后是 σ_{2-3} 、 σ_{3-3} ,其次是 σ_{2-2} 、 σ_{3-2} ,而距离压裂段最远的 σ_{2-1} 和 σ_{3-1} 最后发生变化,非压裂段应力开始变化的时间明显落后于压裂段应力开始变化的时间。沿着水力压裂裂缝的扩展方向即 σ_1 方向,距离压裂位置越远则在压裂孔径向(σ_2 和 σ_3)上应力出现升高的时间越晚,这主要是因为裂缝是在压裂段附近开始发育并向压裂段以外的区域扩展和延伸,所以造成了在应力状态变化时间上的先后顺序。

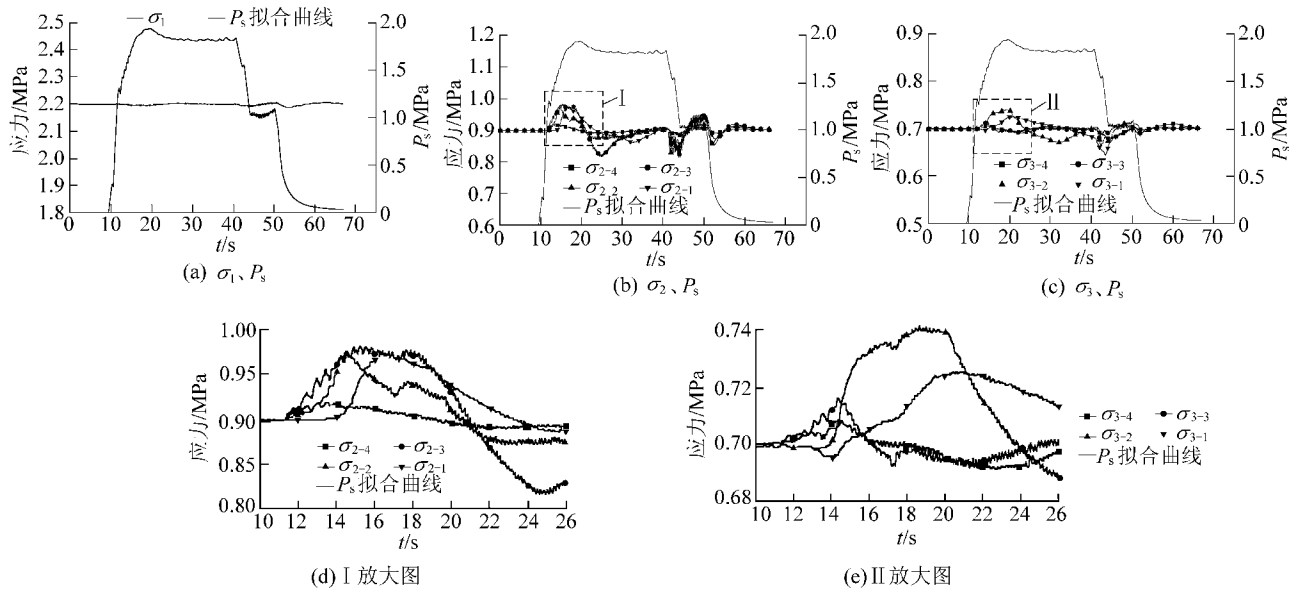


图5 水力压裂过程的应力状态演化规律

Fig. 5 Evolution law of stress during hydraulic fracturing

结合图4,水力压裂过程可大致分为以下4个阶段:①应力积累阶段AB段,对应时刻第10—13 s。在此阶段内,压裂液迅速充满压裂段, P_s 迅速攀升。压裂液对压裂孔孔壁的作用造成试件在压裂孔径向上膨胀变形,随着水压力的升高,压裂液对压裂孔径向产生的应力越来越大,进而表现为 σ_2 和 σ_3 一定程度上的升高。不仅在压裂段,这种应力的升高(σ_2 、 σ_3)同样出现在相邻的非压裂段;而由于最大主应力 σ_1 平行于压裂孔,所以 σ_1 并未出现明显波动;②微破裂发育阶段BC段,在图中大致对应第14—

18 s。煤岩体、混凝土等准脆性材料的水力压裂过程中,在 P_s 达到起裂压力前,压裂孔孔壁处会发育一定的微破裂^[19-21]。在此阶段内 P_s 持续上升,但 P_s 拟合曲线斜率相对于应力积累阶段有所降低(即 P_s 拟合曲线中BC段斜率小于AB段斜率),且 P_s 实测压力相对于应力积累阶段产生了更大幅度的波动。随着 P_s 的升高,在其达到起裂压力左右时, σ_2 与 σ_3 均由升高转变为降低,这是由于水力压裂的卸压造成了中间主应力方向和最小主应力方向上应力的降低;③裂缝失稳扩展阶段CD段,对应时刻为第

19—40 s。 P_s 在 C 点达到起裂压力而后产生一定程度的降低,之后保持稳定,在此水压力作用下裂缝不断地扩展。而 σ_2 和 σ_3 在应力加载伺服控制系统的作用下逐渐趋于稳定;④压裂后阶段 DE 段,在图中大致对应第 41—50 s。随着主裂缝的逐渐成熟,在第 40 s 时,由于裂缝扩展至试件的边缘而造成压裂液流出, P_s 大幅度降低,在 50 s 时关闭水泵,结束水力压裂作业。

2.3 水力压裂过程中水压力场演化规律

为对比分析水力压裂过程中沿裂缝扩展方向水

压力场的时空演化规律,采用 Origin 软件中的 Kriging 插值法分别对第 4 断面、第 3 断面、第 2 断面、第 1 断面及主层面、主纵面的水压力进行插值处理,并选取第 10、18、30、44 s 这 4 个时刻点分别反映水力压裂开始时、 P_s 达到起裂压力时、裂缝稳定扩展时和试件被压裂后作水压力等值线图,如图 6、图 7 所示。其中图 6 为第 4 断面至第 1 断面不同时刻水压力等值线图,图 7 为主层面和主纵面不同时刻水压力等值线图。

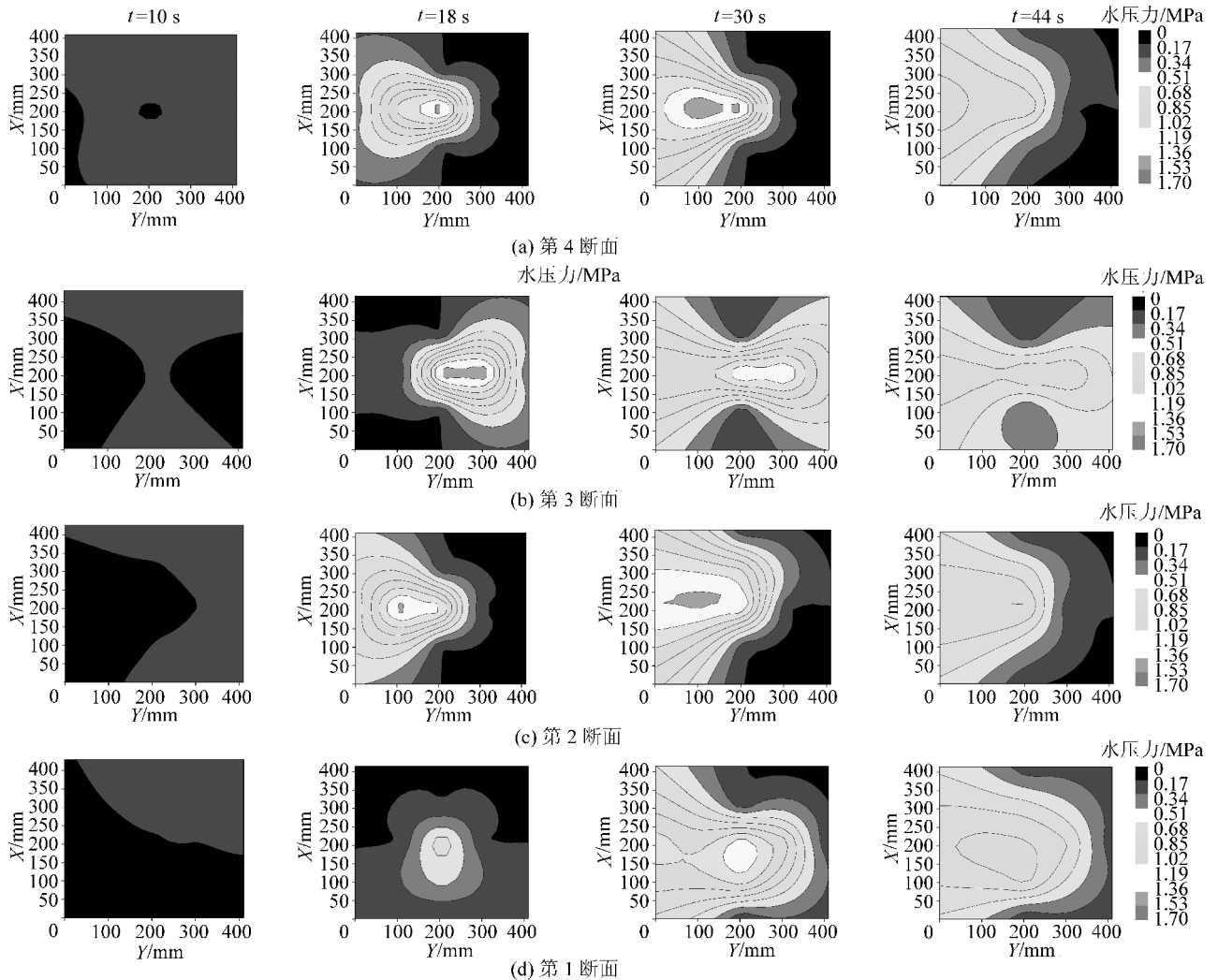


图 6 各断面水压力等值线

Fig. 6 Water pressure contour line of each section

由于压裂液在第 10 s 时刚进入压裂孔内,所以在第 4 断面至第 1 断面上均未出现水压力的升高。随着水力压裂的进行, P_s 在第 18 s 时达到起裂压力,处于压裂段位置的第 4 断面、第 3 断面和第 2 断面上各水压力等值线以压裂孔为中心呈近似椭圆形,椭圆长轴大致平行于 Y 轴,最高一级水压力等

值线范围出现在断面的中心位置即压裂孔所在位置,水压力沿着半径向外呈现出降低的趋势且在各个方向上水压力等值线分布均匀且较密,水压力梯度处于较高的水平。在第 18 s,第 1 断面上最大水压力相对于第 4、3 断面还处于较低的水平,且水压力等值线较为稀疏,水压力梯度较低。第 4 断面、第

3断面和第2断面水压力等值线并不是以压裂孔为中心对称分布而是表现出沿 Y 轴一定程度的偏移,这主要是由于裂缝在 Y 轴方向上不完全对称扩展而造成的。第30 s时,各断面水压力等值线在第18 s的基础上进一步扩大但并未改变其大致平行于 Y 轴的规律。相对于 P_s 达到起裂压力时(第18 s)各断面的水压力场,由于主裂缝的进一步发育和扩展,第30 s时各断面上水压力等值线较为稀疏,这说明水压力梯度相对于第18 s时更低,而各级水压力作用范围均在第18 s的基础上出现了较大幅度的扩大,这说明在裂缝失稳扩展阶段,伴随裂缝的进一步发育成熟,水压力等值线范围也逐渐扩大。第44 s时,由于裂缝已经扩展至试件边缘而造成压裂液流出, P_s 和裂缝内水压力大幅度降低,将第44 s时各断面水压力场与第30 s时进行对比可以发现,由于压裂液的渗失而使得各断面上水压力等值线变得非常稀疏且最大水压力值处于较低水平,但第44 s时的水压力作用范围相对于第30 s并未出现明显的减小。

同样地,由于压裂液在第10 s时刚进入压裂孔内,所以在主层面和主纵面上均未出现水压力的升高。由图7可知,第18 s时,在主层面和主纵面上水压力作用范围关于压裂孔轴线呈近似对称分布,在空间上水压力等值线范围大致为与压裂孔同轴且半径大于压裂孔半径的圆柱体,在圆柱体轴线附近区域水压力最高,沿圆柱体半径向外水压力值逐渐降低。在 P_s 达到起裂压力时(第18 s),水压力等值线沿 Z 轴方向(σ_1 方向)上的扩展长度明显大于沿中间主应力方向和最小主应力方向上的扩展长度,

这主要是由于裂缝更倾向于沿着最大主应力方向扩展而造成水压力等值线沿最大主应力方向扩展速度最快。第30 s时,主层面和主纵面上水压力等值线在第18 s的基础上开始朝着平行于最小主应力 σ_3 方向和中间主应力 σ_2 方向扩展,各级水压力等值线范围变得更大。与主纵面相比,水压力等值线在主层面上扩展更为明显,这是因为水压力作用范围受裂缝空间形态的影响,裂缝延伸到的位置则水压力大,远离裂缝的区域受水压力作用就小或不受水压力作用影响。第44 s时,由于裂缝内水压力的降低使得主层面和主纵面上水压力等值线变得稀疏,水压力梯度变小且最大水压力值处于较低水平,但水压力等值线范围大致与第30 s时一致。

从水力压裂过程中各断面和主层面、主纵面水压力场的演化规律可以看出,裂缝形态与压裂孔附近水压力场演化联系密切,水压力场等值线在压裂初期大多关于压裂孔轴线呈对称分布,但随着裂缝的扩展水压力场等值线更易发育成为长轴大致平行于裂缝的近似椭圆形。

P_s 达到起裂压力之后(第18 s后),试件内部已开始形成较为成熟的主裂缝。由于裂缝更倾向于沿 Z 轴方向(σ_1 方向)延伸,且裂缝大致关于压裂孔中心位置对称,分别选取第4、3、2、1断面上中心位置处水压力传感器,选取第19、21、23、25、27、29 s共6个时刻对局部破裂形成与扩展阶段裂缝内部水压力沿着 Z 轴方向的时空演化规律进行分析,如图8a所示,横坐标表示各断面所对应的 Z 坐标值,纵坐标表示各断面上中心位置处水压力 P 。

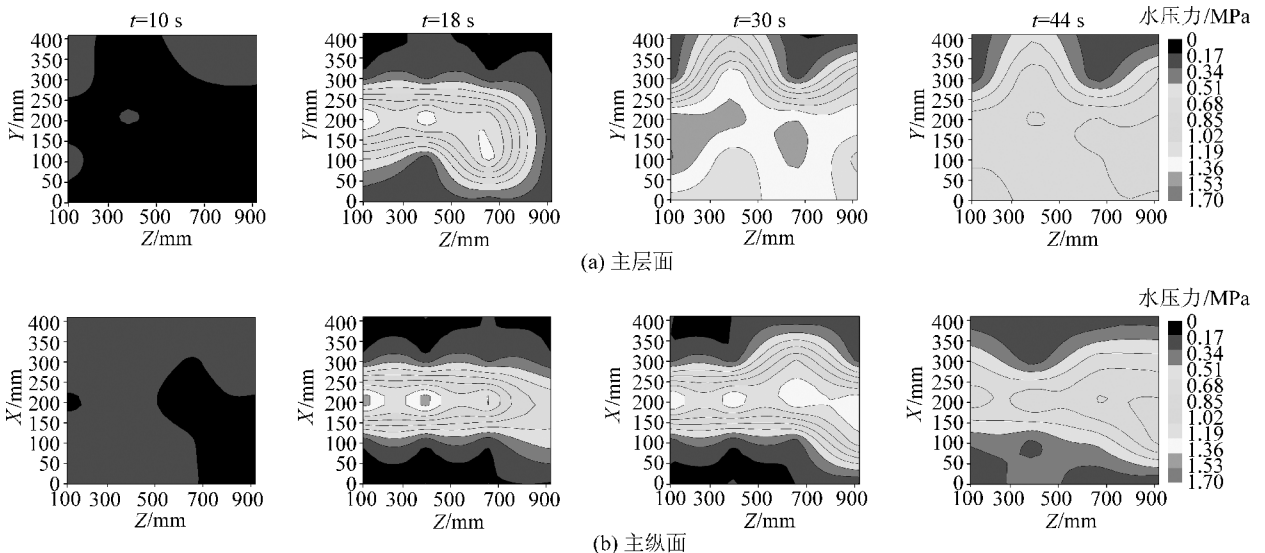


图7 主层面、主纵面水压力等值线

Fig. 7 Water pressure contour line of main plane and main longitudinal plane

由图8a可以发现,沿着Z轴正方向,水压力有着较为明显的下降趋势,这是由于压裂液在裂缝内部流动的过程中,伴随着裂缝的发育、延伸会造成部分能量的损失。随着时间的增加,水压力下降趋势逐渐变缓。从图8b可明显看出,第4断面与第1断面之间、第3断面和第2断面之间、第2断面和第1断面间的水压力差均呈现出随着时间的增加逐渐降低的趋势,且水压力差的变化速率随时间的增加而减小。而第4断面与第3断面之间的水压力差始终处于较低水平,并且随着时间的增加并未呈现出规律性的升高或者降低趋势,而是随着时间的增加而波动,这是由于第3断面紧邻第4断面即压裂段而使得两断面之间的水压力差较小,水泵水压力的脉冲作用造成了4,3断面之间的水压力差不停波动。第19s时3,2断面间水压力差要明显大于2,1断面间水压力差且在19~23s内,3,2断面间水压力差始终大于2,1断面间水压力差,在23s以后,3,2断面间水压力差与2,1断面间水压力差基本处于同一水平。

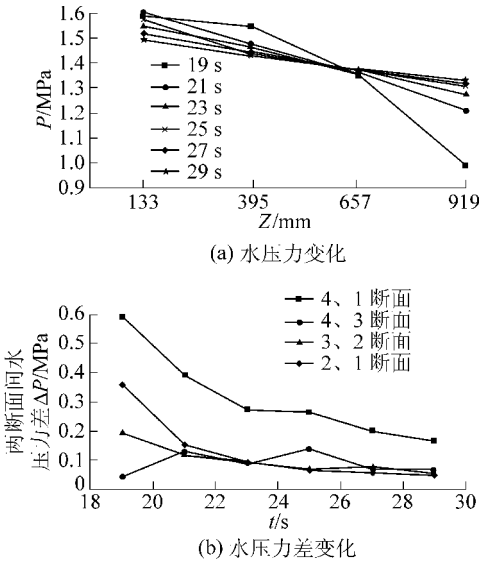


图8 沿Z轴方向水压力时空演化规律

Fig. 8 Evolution law of water pressure along Z axis

2.4 水力压裂致裂面演化分析

由于试件在水力压裂过程中产生了破裂面,为防止在试件取出的过程中破坏压裂孔位置及形态,且便于后期对压裂面进行分析,提前向压裂孔灌入少量膨胀剂用于标记压裂孔位置。待膨胀剂凝固后将试件从试验箱体中取出,并对试验后试件进行剖分,经处理后可明显看出,水力压裂过程中所形成的压裂面将原本完整的试件分割成上下2块,图9a为

下半块试件。

为更加直观地表述水力压裂面的空间位置,将水力压裂过程中处于试验箱体左下角的试件端点作为原点O,建立与图3相同的直角坐标系并利用3D扫描仪对压裂面进行三维扫描后得图9b,图中点划线表示压裂孔所在空间位置,黑色曲线勾勒出了压裂面轮廓线。从图9中可以看出压裂面为一个大致平行于Y轴(σ_3 方向)的不规则破裂面。在靠近压裂段一端,破裂面近乎平行于Y轴(σ_3 方向)且与压裂管在X轴上处于同一标高,这与图6中第4断面水压力等值线更倾向于沿平行于Y轴方向扩展的特征相互印证。

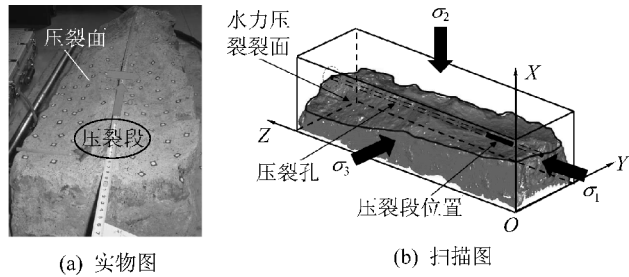


图9 水力压裂裂缝形态

Fig. 9 Fracture morphology caused by hydraulic fracturing

沿Z轴正方向(σ_1 方向),压裂面以压裂孔轴线为中心发生了一定程度的偏转,图9b中处于XOZ平面内的压裂面轮廓线沿着Z轴正方向,其在X轴上的坐标值有较为明显的降低过程,远离压裂段一端的压裂面不再平行于Y轴(σ_3 方向),而表现为介于平行X轴(σ_2 方向)和平行Y轴(σ_3 方向)的中间状态。形成这种压裂面形态的主要原因是由于地应力在裂缝的延伸的过程中逐渐成为控制裂缝形态的主要因素,而试验中 σ_2 与 σ_3 相差较小,仅为0.2 MPa,且裂缝在扩展的过程中往往遵循能量最低原则^[22],这就使得裂缝在延伸、扩展的过程中可能会发生一定程度的偏转。

结合本文中水压力场演化过程可以发现,在整个水力压裂过程中各断面上水压力等值线更倾向于沿着Y轴(σ_3 方向)扩展,且靠近压裂段一端的断面这种规律更加明显。主层面与主纵面相比,水压力等值线沿平行于Y轴(σ_3 方向)扩展的倾向性明显强于沿平行于X轴(σ_2 方向)扩展的倾向性。而水力压裂面大致平行于Y轴(σ_3 方向)与水力压裂过程中水压力场的演化相互印证,水力化作用是裂缝产生的主要因素,同时裂缝的发育、延伸又是水压

力场演化的直接原因,水力压裂裂面的发育扩展与水压力场的演化之间联系密切。

3 结 论

1)水力压裂整个过程可根据水泵水压曲线及煤体应力演化规律分为4个阶段,即应力积累阶段、微破裂发育阶段、裂缝失稳扩展阶段、压裂后阶段。

2)在水力压裂的过程中由于压裂液对压裂孔孔壁的膨胀作用,处于压裂孔径向上的中间主应力和最小主应力会发生显著变化,而平行于压裂孔轴线方向的应力变化不明显。水力压裂裂缝是在压裂段形成后向外扩展的,所以在裂缝扩展范围内距离压裂段越远的位置发生应力升高的时间越晚。

3)水力压裂过程中水压力场的演化与裂缝的发育、扩展有着密切的联系。水压力等值线在压裂初期大多关于压裂孔轴线呈对称分布,而随着裂缝的发育和延伸,水压力等值线更倾向于沿着裂缝扩展的方向发展。由于在水力压裂过程中裂缝沿最大主应力方向扩展速度最快,所以水压力等值线沿最大主应力方向的扩展速度明显大于沿中间主应力和最小主应力方向的扩展速度。

参考文献 (References):

[1] 秦勇,申建.论深部煤层气地质问题[J].石油学报,2016,37(1):125-136.
Qin Yong, Shen Jian. On the fundamental issues of deep coalbed methane geology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(1): 125-136.

[2] 王耀锋,何学秋,王恩元,等.水力化煤层增透技术研究进展及发展趋势[J].煤炭学报,2014,39(10):1945-1955.
Wang Yaofeng, He Xueqiu, Wang Enyuan, et al. Research progress and development tendency of the hydraulic technology for increasing the permeability of coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1945-1955.

[3] 杨宏伟.低透气煤层井下分段点式水力压裂增透[J].北京科技大学学报,2012,34(11):1235-1238.
Yang Hongwei. Underground segmentation point hydraulic fracturing antireflection for low-permeability coal seams[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(11): 1235-1238.

[4] 辛新平,高建良,马耕,等.穿层孔吞吐压裂水力强化抽采技术研究及应用[J].采矿与安全工程学报,2014,31(6):995-1000.
Xin Xinping, Gao Jianliang, Ma Geng, et al. Research and application of gas drainage with hydraulic reinforcement of water stimulation fracture in borehole through strata[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(6): 995-1000.

[5] Yew C H, Schmidt J H. On fracture design of deviated wells[J]. SPE 19722, 1989.

[6] 杜春志,茅献彪,卜万奎.水力压裂时煤层裂缝的扩展分析[J].采矿与安全工程学报,2008,25(2):231-238.
Du Chunzhi, Mao Xianbiao, Bu Wankui. Analysis of fracture propagation in coal seams during hydraulic fracturing[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(2): 231-238.

[7] 林柏泉,李子文,翟成,等.高压脉动水力压裂卸压增透技术及应用[J].采矿与安全工程学报,2011,28(3):452-455.
Lin Baiquan, Li Ziwen, Zhai Cheng, et al. Pressure relief and permeability-increasing technology based on high pressure pulsating hydraulic fracturing and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 452-455.

[8] 张羽,张遂安,刘元东,等.煤岩水力压裂裂缝扩展规律实验研究[J].中国煤炭地质,2015,27(8):21-25.
Zhang Yu, Zhang Suian, Liu Yuandong, et al. An experimental study on coal and rock hydraulic fracturing fissure outspread pattern[J]. Coal Geology of China, 2015, 27(8): 21-25.

[9] 邓广哲,王世斌,黄炳香.煤岩水压力裂缝扩展行为特性研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(20):3489-3493.
Deng Guangzhe, Wang Shibin, Huang Bingxiang. Research on behavior character of crack development induced by hydraulic fracturing in coal-rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3489-3493.

[10] 唐书恒,朱宝存,颜志丰.地应力对煤层气井水力压裂裂缝发育的影响[J].煤炭学报,2011,36(1):65-69.
Tang Shuheng, Zhu Baocun, Yan Zhifeng. Effect of crustal stress on hydraulic fracturing in coalbed methane wells[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 65-69.

[11] 李杭州,张恩强.煤体裂纹水压力致裂的扩展机理[J].西安科技大学学报,2003,23(4):372-374.
Li Hangzhou, Zhang Enqiang. Mechanic of coal crack growth under water pressure[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2003, 23(4): 372-374.

[12] 阳友奎,肖常富,吴刚,等.不同地应力状态下水力压裂的破裂模式[J].重庆大学学报,1993,16(3):31-35.
Yang Youkui, Xiao Changfu, Wu Gang, et al. Hydrofracturing breakdown modes under different in-situ stress states[J]. Journal of Chongqing University, 1993, 16(3): 31-35.

[13] 刘建军,冯夏庭,裴桂红.水力压裂三维数学模型研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(12):2042-2046.
Liu Jianjun, Feng Xiating, Pei Guihong. Study on mathematical model of three dimensional hydraulic fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(12): 2042-2046.

[14] 张国华,葛新.水力压裂钻孔始裂特点分析[J].辽宁工程技术大学学报,2005,24(6):789-792.
Zhang Guohua, Ge Xin. Analysis of start-split characteristic of hydraulic fracture bore[J]. Journal of Liaoning Technology University, 2005, 24(6): 789-792.

[15] 陈向军,程远平,何涛,等.注水对煤的瓦斯扩散特性影响[J].采矿与安全工程学报,2013,30(3):443-448.
Chen Xiangjun, Cheng Yuanping, He Tao, et al. Water injection

(下转第42页)

- ring morphology based on damage mechanics analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(7): 2205-2210.
- [27] 王瑞和,周卫东,沈忠厚,等.旋转射流破岩钻孔机理研究[J]. *中国安全科学学报*, 1999, 9(S1): 1-5.
Wang Ruihe, Zhou Weidong, Shen Zhonghou, *et al.* Study on mechanism of rock-breaking by swirling water [J]. *China Safety Science Journal*, 1999, 9(S1): 1-5.
- [28] 王瑞和,倪红坚.高压水射流破岩机理研究[J]. *石油大学学报:自然科学版*, 2002, 26(4): 118-122.
Wang Ruihe, Ni Hongjian. Research of rock fragmentation mechanism with high-pressure water jet [J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 2002, 26(4): 118-122.
- [29] 王耀锋.三维旋转水射流扩孔与压裂增透技术工艺参数研究[J]. *煤矿安全*, 2012, 43(7): 4-7.
Wang Yaofeng. Process parameters study on reaming and fracturing antireflection technology of three dimensional rotational water jetting [J]. *Safety in Coal Mines*, 2012, 43(7): 4-7.
- [30] 徐秉业,刘信声.应用弹塑性力学[M].北京:清华大学出版社, 1995.
- [31] 徐幼平,林柏泉,翟成,等.定向水力压裂裂隙扩展动态特征分析及其应用[J]. *中国安全科学学报*, 2011, 21(7): 104-110.
- Xu Youping, Lin Baiquan, Zhai Cheng, *et al.* Analysis on dynamic characteristics of cracks extension in directional hydraulic fracturing and its application [J]. *China Safety Science Journal*, 2011, 21(7): 104-110.
- [32] 姜光杰,孙明闯,付江伟.煤矿井下定向压裂增透消突成套技术研究及应用[J]. *中国煤炭*, 2009, 35(11): 10-14.
Jiang Guangjie, Sun Mingchuang, Fu Jiangwei. Research and application of complete set of technology for directional fracturing to increase coal seam permeability and eliminate coal/gas outbursts in underground coal mines [J]. *China Coal*, 2009, 35(11): 10-14.
- [33] 孙洋,王彪,王巧云,等.涂层式裂纹监测系统中基体裂纹穿越行为研究[J]. *力学学报*, 2015, 47(5): 772-777.
Sun Yang, Wang Biao, Wang Qiaoyun, *et al.* Study of the substrate crack penetration mechanisms in crack-detected coating system [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(5): 772-777.
- [34] He M Y, Evans A G, Hutchinson J W. Crack deflection at an interface between dissimilar elastic material; role of residual stresses. *International Journal of Solids and Structure*, 1994, 31(24): 3443-3455.
- exploitation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(S2): 966-975.
- [19] Georgee. Andreev. Brittle Failure of Rock Materials Test Results and Constitutive Models [M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995: 1-5.
- [20] 朱万成,唐春安,杨天鸿,等.岩石破裂过程分析(RFPA^{2D})系统的细观单元本构关系及验证[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(1): 24-29.
Zhu Wancheng, Tang Chun'an, Yang Tianhong, *et al.* Constitutive relationship of mesoscopic elements used in RFPA^{2D} and its validations [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(1): 24-29.
- [21] 马衍坤,刘泽功,周健,等.基于孔壁应变发展规律的压裂孔三阶段起裂特征试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(8): 2151-2158.
Ma Yankun, Liu Zegong, Zhou Jian, *et al.* Study of tri-stage fracturing characteristic of borehole based on strain of hole-wall in hydraulic fracturing process [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(8): 2151-2158.
- [22] 王鸿勋.水力压裂原理[M].北京:石油工业出版社, 1987.

(上接第16页)

impact on gas diffusion characteristic of coal [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(3): 443-448.

- [16] 郭红玉,苏现波.煤层注水抑制瓦斯涌出机制研究[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(6): 928-931.

Guo Hongyu, Su Xianbo. Research on the mechanism of gas emission inhibition in water-flooding coal seam [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(6): 928-931.

- [17] 赵东,冯增朝,赵阳升.高压注水对煤体瓦斯解吸特性影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(3): 547-555.

Zhao Dong, Feng Zengzhao, Zhao Yangsheng. Experimental study of effects of high pressure water injection on desorption characteristic of coal-bed methane [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(3): 547-555.

- [18] 刘东,许江,尹光志,等.多场耦合煤层气开采物理模拟试验系统的研制与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(S2): 966-975.

Liu Dong, Xu Jiang, Yin Guangzhi, *et al.* Development and application of multifield coupling testing system for coal-bed methane