电脉冲应力波作用下煤体微裂隙形成与发展过程

周晓亭[1],秦 勇[1],李恒乐[1],张永民[2],邱爱慈[2],师庆民[1]
(1.中国矿业大学 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室,江苏 徐州 221116;2.西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049)

摘 要: 为解决高聚能电脉冲应力波煤储层致裂增渗新技术发展初期的诸多问题,采用电脉冲应力波加载试验与微区观测手段对鄂尔多斯盆地肥煤样品微裂隙的发生发展过程及其影响因素进行了研究。结果表明:在重复电脉冲应力波加载试验中,随冲击次数增多,微裂隙线密度增大,新生微裂隙的形成起源于冲击波产生的张剪性应力;煤体受力破坏过程大致分为 3 个阶段,冲击 4 次时煤体微裂隙网络基本形成,且没有明显的煤屑产生,为最佳冲击次数。煤体微裂隙网络主要发育在镜质组条带中,新生微裂隙优先从尺寸较大的原有结构性缺陷部位开始扩展,电脉冲应力波对煤体致裂增渗的效果十分明显,煤体中存在的原有结构缺陷是煤体微裂隙萌生的主要部位;煤岩条带类型及其组合方式,是制订煤储层增渗改造措施应考虑的重要地质因素。

关键词: 煤储层;电脉冲;冲击载荷;微裂隙;煤岩显微组分
中图分类号: TD712;P618 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2015)02-0127-04

Formation and development of coal micro-fractures under stress wave induced by electrical impulses

ZHOU Xiao-ting[1],QIN Yong[1],LI Heng-le[1],ZHANG Yong-min[2],QIU Ai-ci[2],SHI Qing-min[1]
(1.*MOE Key Lab of CBM Resources and Formation Process,China University of Mining and Technology,Xuzhou* 221116,*China*;
2.*School of Electrical Engineering,Xi'an Jiaotong University,Xi'an* 710049,*China*)

Abstract: In order to solve many problems occurred in the initial development period of the new coal reservoir fracturing and permeability improvement technology with high accumulated energy electric impulse stress wave,the electric impulse stress wave loading experiment and micro-location observation means were applied to the study on the micro crack occurred development process of the fat coal sample from Ordos Basin and the influence factors.The results showed that in the repeated electric impulse stress loading experiment,with the impact number increased,the micro crack line density would be increased and the formation of the new generated micro crack would come from the shearing stress occurred by the impact wave.The stress failure process of coal could be divided to three stages generally.The micro crack network of coal would be basically formed when the coal was impacted fourthly,there would be no coal cuttings occurred obviously,so impacted fourthly was the best condition.The micro crack network of coal would be mainly developed in the vitrinite band,new generated micro cracks would have a priority to start the expansion in the large size original structural defects.The electric impulse stress wave would have obvious fracturing and permeability effect of the coal and the original structural defects existed in the coal would be main part to have the coal micro cracks.The coal and rick bands type and other combined mode would be the important geological factor considered to set up the coal reservoir permeability improvement and reconstruction measures.

Key words: coal reservoir; electric impulse; impact load; micro crack; coal macerals

0 引 言

我国煤层气单井产量总体偏低,制约煤层气抽采的主要瓶颈是煤层的低渗透性。探索新的技术原理进而研发煤储层改造新技术,是增加煤储层渗透率以提高单井产气量的客观途径,高聚能重复电脉

收稿日期: 2014-10-22;**责任编辑:** 王晓珍 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2015.02.029
基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05034);国家自然科学基金重点资助项目(U1361207)
作者简介: 周晓亭(1989—),女,黑龙江望奎人,硕士研究生。**通信作者:** 秦 勇,教授,博士,E-mail:yongqin@cumt.edu.cn
引用格式: 周晓亭,秦 勇,李恒乐,等.电脉冲应力波作用下煤体微裂隙形成与发展过程[J].煤炭科学技术,2015,43(2):127-130,143.
ZHOU Xiao-ting,QIN Yong,LI Heng-le,*et al*.Formation and development of coal micro-fractures under stress wave induced by electrical impulses[J].Coal Science and Technology,2015,43(2):127-130,143.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

冲应力波技术正是近年来探索的前缘方向之一[1-2]。该项技术的原理，是在充满水的煤储层中释放高压电脉冲，通过液电效应将高功率电磁能量转换为冲击应力波，从而达到激励和改造煤储层的效果[1,3-5]。近年来，该项技术在国内有关煤层气开发区块试用，证明其煤储层增渗的可行性[1,5]。但是，电脉冲应力波煤储层激励与改造机理目前仍不清晰，导致激励工艺方案缺乏针对性的设计依据[2]。为此，笔者基于高聚能重复脉冲波物理模拟试验，采用微区分析与数值模拟相结合的方法，探索冲击应力波动载荷作用下煤体微裂隙的发育规律及影响因素，以期推动该项煤储层致裂增渗新技术理论基础的发展。

1　样品与试验方法

试验样品采自鄂尔多斯盆地西北部呼鲁斯太矿区乌兰煤矿，采样层系为上石炭统太原组 7 号煤层。煤样为原生结构半暗煤，煤阶为肥煤。在实验室将大块煤样沿平行和垂直层理方向切割，加工制备成若干个边长为 30 cm 的立方体试件。

高聚能重复脉冲波物理模拟试验在自行设计的试验装置上完成。装置主要由水罐、模拟井眼、电脉冲波发生装置(能量转换器)、压力传感器等 4 个部分组成(图 1)，脉冲波最大压力 5~6 MPa[5]。将试件按层理面水平位置放入高 1.2 m、水深 0.8 m 的水罐中，在 2 个电极间放入金属丝，然后开始电脉冲强冲击波加载试验，冲击应力波沿层理方向进入试件。能量转换器放电电压为 18 kV、电流 10 mA，每次试验分别加载 2 次、4 次、8 次和 10 次，重复 10 遍。

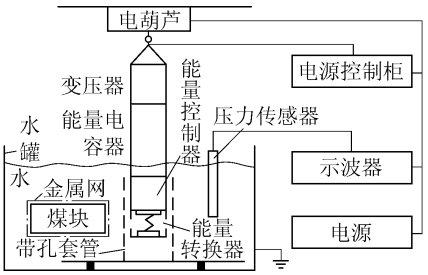


图 1　加载试验装置示意

冲击载荷不是一个常数，而是时间的函数。作用力一般在数十微秒内由零骤增，再经数百微秒又重新衰减到零。煤体在这种急剧变化的载荷作用下，既产生运动，又产生变形，这种动载变形无法用肉眼观察，需要借助微观手段。

采集冲击波试验过程中从试件上掉落的小块煤样制成块砖光片，抛光面垂直煤层层理面。在光学显微镜 20 倍物镜条件下，垂直一组裂隙走向统计微裂隙条数，行距 5 mm，然后计算整个光片的微裂隙平均线密度。同时，在 FEI Quanta TM250 型扫描电子显微镜下观察拍照，分析载荷作用下煤样微裂隙的细观断裂破坏过程和力学行为。

2　试验结果

2.1　宏观裂隙发生发展过程

试件在整个加载过程的宏观破裂情况如图 2 所示。



(a) 原始试件　(b) 加载 2 次　(c) 加载 4 次　(d) 加载 8 次　(e) 加载 10 次

图 2　煤岩试件在载荷作用下的破坏过程

可以看出，加载前的原始试件平行层理的天然裂隙发育明显，斜交层理面的天然裂隙仅隐约可见；加载 2 次时，斜交层理的天然裂隙变得清晰可见，在斜交天然裂隙附近且与斜交裂隙连通的水平裂隙变化，表明这种加载条件下应力主要集中在煤体原有缺陷处，形成的冲击裂隙主要是追踪原有裂隙的进一步扩展；加载 4 次时，除了追踪裂隙宽度进一步扩展之外，产生了与原有斜交裂隙呈“X”形相交的新生斜交裂隙，但没有看到煤块或煤屑振落，裂隙组合显示出张剪性的力学特征；加载 8 次时，前期裂隙两侧煤体碎裂，同时被宏观裂隙所分割的煤基块内部出现明显破裂；加载 10 次后，整个试件解体，破碎煤基块面上“擦痕”清晰可见，进一步表明冲击裂隙的产生起源于冲击波产生的张剪性应力。

对比试件的整个加载破坏过程，加载 4 次时裂隙网络基本形成，且没有明显的煤屑产生；随着加载次数的增多，尽管裂隙网络更为发育，但煤屑煤粉逐渐增多。因此，就试验条件而言，加载 4 次是煤储层

冲击应力波致裂的最佳条件。

2.2　煤体微裂隙线密度及其与加载次数关系

煤砖光片显微镜下统计结果显示: 原始试件的微裂隙密度为 6.9 条/cm，加载 2 次时增加到 7.4 条/cm，加载 4 次、8 次和 10 次时分别为 7.8、8.1 和 8.7 条/cm; 冲击次数增加，煤体破坏程度增强，微裂隙线密度总体上随之增大(图 3) 。

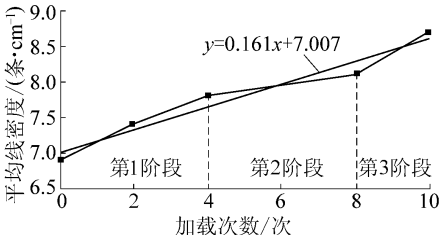


图 3　煤体微裂隙与加载次数的关系

进一步分析，煤体微裂隙线密度随加载次数增加而增大的趋势是非线性的，大致分为 3 个阶段，阶段分界点在加载 4 次和 8 次(图 2) 。结合宏观裂隙的上述发育特征，第 1 阶段以微裂隙网络形成且极少产生煤屑煤粉为特征，第 2 阶段表现为微裂隙网络强化但产生少量煤粉煤屑，第 3 阶段为煤岩解体且煤粉煤屑大量产出为特征。考察上述演化特征: 加载次数增多，微裂隙线密度增大，煤体渗透率会逐渐增加; 适用于煤储层强化改造的试验条件是加载 4 次，微裂隙网络得到强化，但煤粉煤屑很少产出，既可能增加煤储层渗透率，又不会给后续排采留下较大隐患。同时，微裂隙线密度随加载次数增多而增大的总体趋势，也表明冲击应力波作用效果具有较大的机械叠加性或线性加合性。

3　讨论与分析

煤体裂隙在宏观尺度上的性质，共同取决于裂隙细观尺度性质与煤基块细观结构，而煤体细观尺度的力学性质主要受煤体内各煤岩显微组分组成、显微组分力学性质和煤体细观损伤结构的影响。

3.1　冲击载荷作用下煤体的受力特点

较低的冲击应力能将煤体破坏，关键在于煤体本身存在各种结构缺陷，如孔隙和裂隙、颗粒界面等薄弱结构面。这些缺陷的存在，使得加载于煤体上的力在缺陷附近产生应力集中现象，细观尺度上孔隙、裂隙周围可以出现局域的拉伸、压缩和剪切变形[6]。对试件侧面施加较低的电脉冲载荷 σ' 时，冲击产生的压缩应力波沿平行层理面方向传播，由于煤体单元抗压强度较抗拉强度大得多，故产生的应变较小(图 4 中的 A) ; 应力波传递到煤体孔隙、裂隙界面上，使得应力在这些弱结构面附近集中，当应力大于煤体原始应力 σ_k 与弱面黏聚力 R_q 之和时，煤体裂隙将发生扩张(图 4 中的 B) ，同时在弱结构面附近萌生张性和剪性微裂隙(图 5) 。

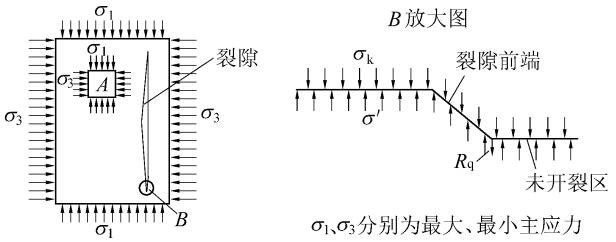
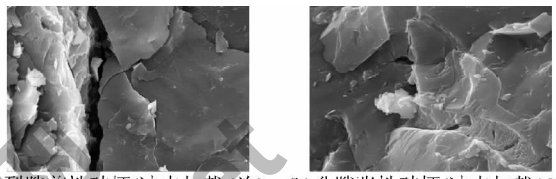


图 4　冲击载荷作用下煤体受力分析



(a)裂隙剪性破坏(冲击加载4次)　(b)孔隙张性破坏(冲击加载10次)

图 5　冲击加载后的煤样试件扫描电子显微镜照片

3.2　冲击载荷下煤体微裂隙发育的显微组分选择

煤岩显微组分自身的力学性质各不相同，表现为显微硬度、显微脆度、显微韧性等有较大差异; 显微脆度较大的显微组分，在动载荷作用下较易产生冲击裂隙[7]。光学显微镜观察结果显示: 在冲击载荷作用下，镜质组中微裂隙密度最高，裂隙宽度相对较大; 即使在同一条贯穿镜质组、壳质组和惰质组的裂隙中，裂隙宽度在镜质组中较大，而在惰质组或壳质组中逐渐减小、分叉甚至逐渐闭合(图 6) 。原因在于，镜质组脆度较大，抗拉强度较低，在冲击应力波作用下容易产生张剪破坏。

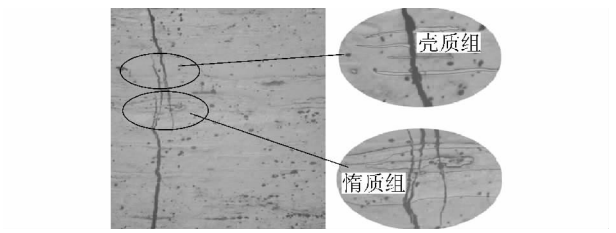


图 6　冲击加载 10 次后的煤体微裂隙发育特征

同时，在冲击载荷作用下，均质镜质组条带中微裂隙发育广泛，形态各异，如折线状、直线状、交叉网络状等; 微裂隙网络通常局限在均质镜质组条带，甚至不向邻近的基质镜质组条带延伸(图 7) 。一般来说，同一煤样中基质镜质组非均质性强，显微韧性相对较大，显微硬度相对较低，均质镜质组则相反[7]。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

这 2 种显微组分之间力学性质的差异，正是造成上述微裂隙发育特征差异的根本原因。进一步而言，煤岩显微组分组成及组合方式，也是控制煤储层增渗改造效果的重要地质原因。

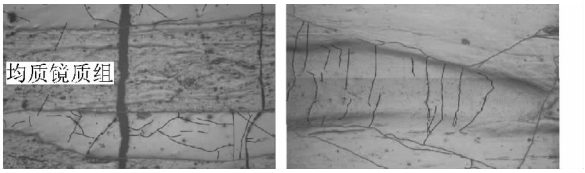


图 7　煤样冲击加载微裂隙网络产出特征

3.3　煤体原有结构缺陷及其尺寸效应对改造效果的影响

材料疲劳破坏一般经历由微观裂纹的萌生、长大到宏观裂纹的形成和扩展等阶段[8]，而煤体中存在的原有结构缺陷正是煤体微裂隙萌生的最主要部位[9]。冲击载荷作用下，这种缺陷对微裂隙发育的影响表现在 2 个方面：一是煤体原有的孔隙、裂隙等会使加载力产生应力集中，出现局域的拉伸和剪切变形，导致裂隙扩展和相互连通（图 2、图 6）；二是原有孔隙和裂隙会对新生微裂隙的扩展产生影响，缺陷尺寸改变得越急剧，应力集中程度就越显著，而新生裂隙尖端扩展到原有结构缺陷处，由于孔隙和裂隙面较裂隙尖端的尺寸改变缓慢，应力集中系数变小，若新生裂隙尖端扩展应力不够大，会导致裂隙扩展止于原有结构缺陷部位（图 8）。



图 8　煤体孔隙附近 FLAC 模拟应力之图

如图 9 所示，当微裂隙尖端扩展应力较大时，主裂隙在位置 1 处起裂，起裂后裂隙尖端集中的应力沿虚线曲折向前传递，遇到第 1 条原生裂隙时，裂隙没有受到较大影响而继续向前扩展，新生裂隙与缝宽较大的原有裂隙相交，二者均发生移位错动；新生裂隙从原有裂隙处再次起裂，继续向左扩展，同时产生向上、下两侧扩展的微裂隙。可见，新生微裂隙与原有微裂隙交汇时，原有微裂隙宽度越大，对新生裂隙扩展的影响程度越大，会发生移动错位现象，并使原生裂隙宽度增加。究其原因，在于新生裂隙与原有裂隙相互贯通后，应力重新分配而导致应力集中程度降低，当再次起裂时，只能集中于原有裂隙的最薄弱处[10-12]。

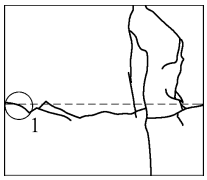


图 9　煤样原有裂隙对新生裂隙演化的影响

冲击载荷破坏效果与煤体原有结构性缺陷尺度之间的关系，可用 Griffith 模型加以描述[13-14]：

$$\sigma_0^2 l = E\gamma f(\mu)$$

其中，σ_0为加载应力；l 为裂隙长度；E 为弹性模量；γ 为表面能；$f(\mu)$ 为关于泊松比 μ 的函数。这些变量均取决于煤体性质。

可以看出，裂隙开始扩展的应力 σ_0与裂隙长度 $l^{1/2}$呈反比，原有裂隙尺寸越大，裂隙扩展所需要的应力就越低。因此，在冲击应力波作用下，煤体中大孔及尺寸较大的裂隙首先受到影响而发生扩展。同时，在重复电脉冲波作用下，煤体受到循环载荷作用，孔隙裂隙的扩展与煤体的疲劳强度相关；冲击加载次数增多，煤体抗疲劳能力减弱，尺寸相对较小的孔隙裂隙也开始破裂。

4　结　论

通过研究，就电脉冲应力波作用下煤体微裂隙形成与发展过程获得新的理解。加载条件下，应力主要集中在煤体原有缺陷处，新生冲击裂隙主要追踪原有裂隙进一步扩展；试件整体裂解后，破碎煤基块面上擦痕清晰可见，表明新生裂隙的产生起源于冲击波诱导的张剪性应力。加载次数增多，微裂隙线密度增大，两者总体上呈正相关关系，大致分为 3 个阶段。第 1 阶段为裂隙网络形成，第 2 阶段微裂隙网络得到强化但煤粉煤屑量极少，第 3 阶段煤岩解体且煤粉煤屑大量产出，因此第 2 阶段试验条件类似于煤储层冲击应力波致裂作业的最佳条件。较低的冲击应力能将煤体破坏，关键在于煤体本身存在各种结构缺陷，实质在于应力集中；应力优先集中在煤体中尺寸较大的孔隙裂隙附近，进而从这些缺陷部位优先扩展。微裂隙网络的发育，通常局限在均质镜质组条带内部，这 2 种显微组分之间力学性质存在显著差异。由此表明，煤岩类型条带及其组合方式，是制订煤储层增渗改造措施时应考虑的重要地质因素。

（下转第 143 页）

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

N_2 型分子筛,当 CH_4/N_2 混合气中 CH_4 浓度过高时,N_2 含量较低,继而导致分子筛床层吸附 N_2 的量减少,因而塔顶成品气中 CH_4 浓度提升程度降低。

3 结　论

1) 通过试验,研究了 CH_4/N_2 混合气在四塔变压吸附装置上的浓缩分离效果。结果表明: 利用 BM1404 碳分子筛,CH_4/N_2 混合气体能得到很好的分离,大部分 N_2 被选择性吸附,CH_4 从塔顶直接排出,省去了以往真空解吸才能获得成品气的步骤,大幅降低了能耗。

2) 不同的吸附时间和成品气排气流量均对 CH_4/N_2 混合气体分离效果有影响,试验发现,当吸附时间为 150 s,成品气排气流量为 4.2 mL/min 时,分离效果最佳。

3) BM1404 碳分子筛样品是一种适合于 CH_4/N_2 混合气变压吸附分离的吸附剂,对低中高浓度煤层气均有较佳的浓缩分离效果。

参考文献:

[1] 朱志敏,沈　冰,蒋　刚.煤层气开发利用现状与发展方向[J].矿产综合利用,2006(6):40-42.

[2] Grande,Carlos A.Carbon molecular sieves for hydrocarbon separations by adsorption [J].Industrial and Engineering Chemistry Research,2005,44(18):7218-7227.

[3] 刘克万,辜　敏,鲜学福.变压吸附浓缩 CH_4/N_2 中 CH_4 的研究进展[J].现代化工,2007,27(12):15-20.

[4] 郭　璞,李　明.煤层气中 CH_4/N_2 分离工艺研究进展[J].化工进展,2008,27(7):963-965.

[5] Brian R Swallow.Process or removing nitrogen from natural gas: US,ZL4352685 [P].1982-10-05.

[6] Ravindra F Pahade,John B Saunders,James J Maloney.Process for separating methane and nitrogen: US,4592767 [P].1986-06-03.

[7] Elkamel A,Noble R D.A statistical mechanics approach to the separation of methane and nitrogen using capillary condensation in a microporous membrane [J].Journal of Membrane Science,1992,65(1/2):163-172.

[8] Asad Javaid,Miehael P Hughey,Varuntida Varutbangkul,*et al*.Solubility based gas parathion with polymer-modified inorganic membranes [J].Journal of Membrane Science,2001,187:141-150.

[9] Mark M Davis,Robert L Gray,Kirit Patel.Process for the purification of natural gas: US,5174796 [P].1992-12-29.

[10] Reinhold Ⅲ,Herbert Edward Knaebel,Kent S,*et al*.Separation of gases by pressure swing adsorption: US,5792239 [P].1998-08-11.

[11] 吴明铂,郑经堂,王茂章,等.炭分子筛概述[J].炭素技术,1997(6):19-22.

[12] 张进华,梁大明,李兰廷.煤基碳分子筛的研究进展及应用现状[J].洁净煤技术,2010,16(5):53-55.

[13] Fran K G Wiessner.变压吸附分离气体原理和工业应用[J].深冷技术,1991(6):7-10.

[14] 姚伟静,辜　敏,鲜学福,等.变压吸附气体分离用煤质碳分子筛的研究进展[J].化工进展,2009,28(4):549-551.

[15] Freitas M M A,Figueiredo J K.Preparation of carbon molecular sieves for gas separations by modification of the pore sizes of activated carbons [J].Fuel,2001,80:1-6.

[16] Ackley,Mark W,Yang Ralph T.Kinetic separation by pressure swing adsorption: Method of characteristics model [J].AIChE Jounal,1990,36(8):1229-1231.

(上接第 130 页)

参考文献:

[1] 邱爱慈,张永民,蒯　斌,等.高功率脉冲技术在非常规天然气开发中应用的设想[C]//谢克昌,黄其励.中国工程院/国家能源局第二届能源论坛论文集.北京: 煤炭工业出版社,2012:22-24.

[2] 秦　勇,邱爱慈,张永民,等.高聚能重复强脉冲波煤储层增渗新技术试验与探索[J].煤炭科学技术,2014,42(6):1-7,70.

[3] 张永民,吕晓琳.高聚能大功率电脉冲装置能量转换器: 中国,CN201206447 [P].2009-03-11.

[4] 吕晓琳,张　硕.基于重复频率冲击波的地面抽采煤层气井改造方法: 中国,CN102155253A [P].2011-08-17.

[5] 白建梅,程　浩,祖世强,等.大功率脉冲技术对低产煤层气井增产可行性探讨[J].中国煤层气,2010,7(6):24-26.

[6] Costin L S,Holcomb D J.Time-dependent failure of rock under cyclic loading [J].Tectonophysics,1981,79(2):279-296.

[7] 秦　勇,李淑琴.煤的显微硬度: 一种预测煤与瓦斯突出的可能参数[J].煤矿工程师,1990(6):25-28.

[8] 王文婕.煤层冲击倾向性对冲击地压的影响机制研究[D].北京: 中国矿业大学(北京),2013.

[9] 胡盛斌,邓　建,马春德,等.循环荷载作用下含缺陷岩石破坏特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(12):2490-2495.

[10] 葛修润,任建喜,蒲毅彬,等.岩土损伤力学宏细观试验研究[M].北京: 科学出版社,2004:4-6.

[11] 许　江,苏小鹏,程立朝,等.压剪应力作用下含瓦斯原煤细观裂隙演化特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(3):458-467.

[12] 孙　博.煤体爆破裂纹扩展规律及其试验研究[D].焦作: 河南理工大学,2011.

[13] 姜耀东,赵毅鑫,何满潮,等.冲击地压机制的细观试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):901-907.

[14] 万菊英,许鹤华,刘唐伟,等.基于逾渗方法的裂隙储层渗透性模拟[J].地球物理学进展,2014,29(3):1306-1311.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net