

基于预设随机裂隙的煤层注水数值模拟研究

周 刚^{1,2}, 徐 茂², 邱 晗²

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590)

摘 要:为研究煤体内大量不规则裂隙对煤层注水效果的影响,通过 MATLAB 编程实现裂隙的随机分布,结合 COMSOL 软件进行煤层注水过程中渗流压力场、速度场与水分增量的数值模拟。研究表明:与注水孔相交裂隙的附近区域内,水压可达 3.03 MPa,此类裂隙可延伸压力场的作用范围;随煤体内水分运移范围的逐渐扩大,平均渗流速度降低,48 h 后约为 $6.59 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,整体渗流速度趋向均衡;未与注水孔相交的裂隙同样可提升注水效果,且毛细作用力对提升煤体润湿效果的影响高于水压对提升煤体润湿效果的影响。

关键词:预设随机裂隙;数值模拟;煤层注水;压力场;速度场;水分增量

中图分类号: TD32

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)02-0038-06

Numerical Simulation of Coal Seam Water Injection Based on Precast Random Fractures

ZHOU Gang^{1,2}, XU Mao², QIU Han²

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: In order to study the effect of a large number of irregular fractures on coal seam, the random distribution of fractures were precast by MATLAB programming. The numerical simulation of the flow field, velocity field and moisture increment in the process of coal seam water injection was carried out with the help of COMSOL. The results show that the water pressure can reach up to 3.03 MPa in position around the fractures intersecting with boreholes, which can extend the action range of pressure field. As the transport scope of coal body water expands gradually, the average seepage velocity decreases. It can decrease to $6.59 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ after 48 hours and the overall seepage velocity tends toward equilibrium then. Fractures which do not intersect with boreholes can also improve the effect of water injection, and the influence of the capillary force to improve the wetting effect of coal body was higher than that of water pressure.

Key words: precast random fractures; numerical simulation; coal seam water injection; pressure field; velocity field; moisture increment

收稿日期: 2015-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474139); 中国博士后科学基金项目(2015M570602); 山东省煤炭安全高效开采技术与装备协同创新中心资助项目; 山东科技大学杰出青年科技人才支持计划项目(2014JQJH106); 国家安全生产监督管理总局安全生产重大事故防治关键技术科技项目(shandong-0083-2015AQ); 2014 年山东省安全生产科技发展计划项目(2014-110); 青岛市博士后研究人员应用研究项目(2015194)

作者简介: 周 刚(1979—), 男, 安徽阜南人, 副教授, 博士, 主要从事矿山灾害预测与控制方面的教学与科研工作。

E-mail: ahsdzhougang@163.com

徐 茂(1992—), 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要从事煤岩渗流数值模拟方面的研究, 本文通信作者。

E-mail: mr_xumao@163.com

作为一种广泛使用的煤体润湿技术,煤层注水可改变煤体力学性质,使煤体结构变得松散和容易割落,在防止冲击地压、降低工作面产尘率及防止瓦斯突出方面作用明显^[1-5]。大量学者就裂隙对各类流体在岩体中流动的影响进行了研究,如罗平等^[6]对倾斜单裂隙宾汉浆液流动模型进行了理论研究,得出浆液流速、渗透距离与压力、裂隙宽度、浆液粘度间的关系。熊祥斌等^[7]系统总结和分析了单裂隙条件下渗流研究的最新进展。同时,诸多学者也针对裂隙的生成及发育规律,尤其是煤体受水压致裂进行了大量研究。张明璐等^[8]针对水压影响下的 Mohr-Coulomb 强度准则进行了修正,并通过数值模拟验证了其准确性。张士川等^[9]对高水压底板突水通道形成与演化过程进行了研究。

但目前针对含裂隙煤体的渗流场研究,大都基于单一裂隙的简单模型或是忽略原生裂隙^[10-11],无法反应煤体内部复杂裂隙对水分渗流过程的影响。由于煤体内部裂隙结构复杂,裂隙在煤层中的相对位置不易确定,且水分运移过程难以监测,难以建立可靠的实验环境来研究注水过程中裂隙对水分运移的作用规律。

因此,本研究采用 MATLAB 编程实现煤体中裂隙的随机分布,并将结果导入 COMSOL 进行数值模拟,得到包含大量裂隙的煤体中渗流压力场、速度场与水分增量的分布及变化规律。

1 数学模型

煤是一种复杂多孔介质,水分在煤体中运移的主要动力为注水压力与毛细作用力。由于水的切应力与剪切变形成线性关系,因此将其视作牛顿流体。

在注水孔及裂隙中,以 Navier-Stokes 方程描述水分的自由流动,其二维形式的微分方程在笛卡尔坐标系下表示为:

$$\begin{aligned} \frac{du_x}{dt} &= f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u_x, \\ \frac{du_y}{dt} &= f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 u_y. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: t —时间; p —煤体中水压,MPa; ν —运动黏滞系数; u_x 与 u_y 分别为 x 轴与 y 轴轴向单位质量力, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; ∇ —那勃勒算子,式(2)为其表达式。

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} u + \frac{\partial}{\partial y} v = \frac{\partial}{\partial x_i} e_i. \quad (2)$$

以 Darcy 定律描述水在煤体内的渗流运动,其二维形式的微分方程在笛卡尔坐标系中表示为:

$$\begin{aligned} v_x &= -\frac{k_w}{\mu_w} \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \right), \\ v_y &= -\frac{k_w}{\mu_w} \left(\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g \right). \end{aligned} \quad (3)$$

式中: v_x 与 v_y 分别为 x 轴与 y 轴方向上的速度分量; k_w —渗透率; μ_w —水的动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; p —煤体中水压,MPa; ρ 为液体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; g —重力加速度常数。

2 物理模型及模拟计算参数设置

2.1 煤体二维物理模型

通过两注水孔轴心做尺寸为 $100 \text{ m} \times 45 \text{ m}$ 的二维切面,建立煤体的二维物理模型。注水孔长度 80 m ,直径 16 mm ,封孔长度 10 m ,注水孔间距为 14 m 。

2.2 随机裂隙的 MATLAB 编程实现

采用 COMSOL 内置的 Livelink with MATLAB 接口,实现 COMSOL 与 MATLAB 的联合仿真。通过 MATLAB 建立煤体二维模型后,在煤体内通过编写命令代码,循环生成 75 条随机裂隙。控制随机裂隙的长度大于 1 m ,宽度不低于 1 mm 。最终建立的煤体模型如图 1 所示,其中不规则短线为预设随机裂隙。

2.3 模拟计算参数设置

依据煤岩基本岩石力学参数,确定数值模拟的计算参数设置如表 1 所示。

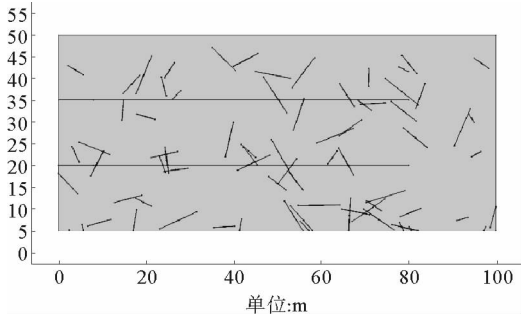


图 1 煤体二维物理模型

Fig. 1 Two-dimensional geometry model of coal body

表 1 主要模拟计算参数设定

Tab. 1 Main calculation parameters of simulation

计算条件名称	参数设置	计算条件名称	参数设置
孔隙率/%	2.9	水的密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.0×10^3
渗透率/ m^2	4.3×10^{-18}	水的动力黏度 /($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	0.98×10^{-3}
泊松比	0.26	注水压力/MPa	4

3 渗流模拟结果分析

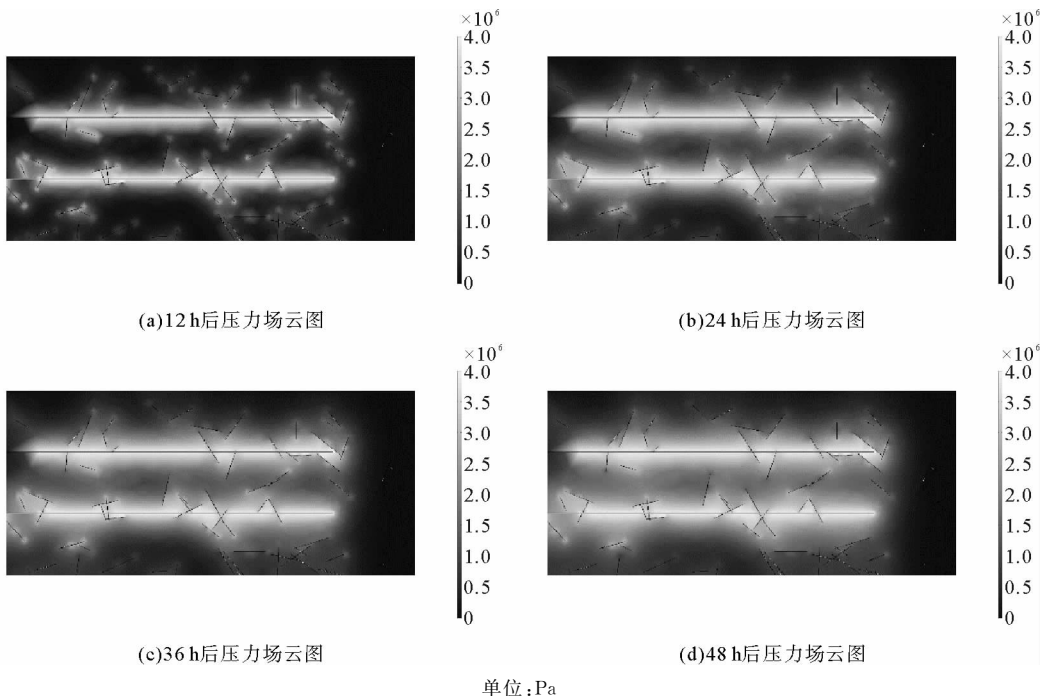
将物理模型导入 COMSOL 后,依据上述数学模型,添加流体在煤体裂隙及煤体空隙中的流动控制方程。截取模拟结果中 12,24,36,48 h 四个时间节点的渗流压力场、渗流速度场与水分增量的分布云图进行研究。

3.1 压力场结果分析

对比各时间点的压力场分布云图(图 2~3),可得出煤体压力分布规律。

1) 水压以注水孔为轴心,呈辐射形向外梯度下降。半径约 5 m 范围外,水压基本消耗殆尽。

2) 压力场在 24 h 内变化明显,随水分运移,相对高压(2 MPa 以上压力)区域逐渐增加。24 h 后,相对高压区域仍不断扩大,但增速明显放缓。图 3 中统计数据表明:0~12 h,煤体平均压力上升约 0.98 MPa;12~24 h,煤体平均压力上升约 0.55 MPa,24~36 h,煤体平均压力上升约 0.15 MPa;36~48 h,煤体平均水压上升约 0.08 MPa。



单位:Pa

图 2 压力场分布

Fig. 2 The distribution of pressure field

3) 由图 2 可以看出,高水压区域沿穿过注水孔的裂隙向外侧延伸,此类裂隙附近煤体内的水压在 48 h 后的平均值约 3.03 MPa,明显高于 1.76 MPa 的煤体整体平均水压。同时,由于下侧注水孔穿过的裂隙较上侧注水孔穿过的裂隙略多,因此使得下侧注水孔附近煤体内的高水压区域范围略大于上侧注水孔。上述特征均表明与注水孔相交的裂隙可延伸水压的作用范围。

3.2 速度场结果分析

对比各时间点的速度场分布云图(图 4),可得出水分在煤体中的运移规律。

1) 注水前期,水的运移范围局限于注水孔及裂隙附近,渗流速度较高。12 h 后,注水孔附近区域平均渗流速度约 $0.034 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最高处接近 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

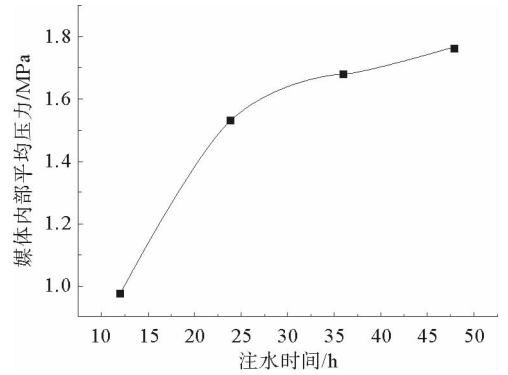


图 3 煤体平均压力统计图

Fig. 3 Statistical figure of average pressure of coal

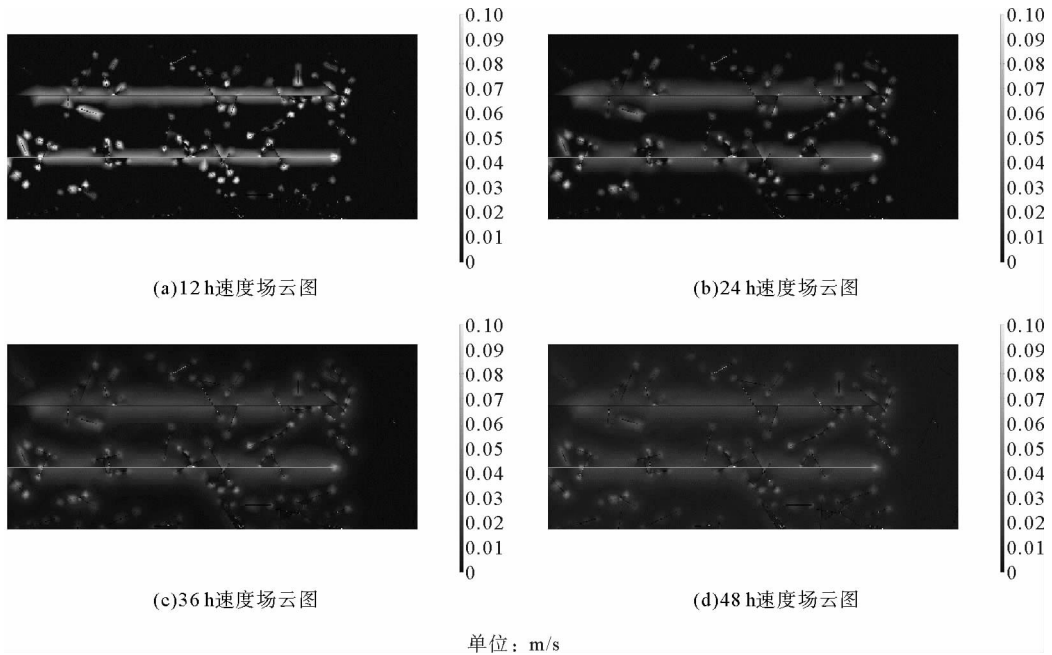


图 4 速度场分布

Fig. 4 The distribution of velocity field

2) 随时间推移,水分运移范围逐渐扩大,平均渗流速度降低,整体渗流速度趋向均衡。统计得到:12 h 后,煤体内平均渗流速度约 $10.49 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;24 h 后,煤体内平均渗流速度约 $7.48 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;36 h 后,煤体内平均渗流速度约 $6.86 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;48 h 后,煤体内平均渗流速度约 $6.59 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3) 分析渗流速度云图可以得到,水分在煤体内的渗流范围局限于注水孔及裂隙附近,且随注水工作进行,水分渗流范围的扩展速度逐渐降低,水流趋向静止。

3.3 水分增量结果分析

对比各时间点的水分增量分布云图(图 5),可得出水分增量的变化规律。

1) 注水前期,水分以注水孔为轴心,向整个煤体中扩散,与注水孔相交的裂隙扩大了注水孔表面积,延伸了注水孔的作用范围。由图 5 分析可得,与注水孔相交裂隙附近的煤体内,其水分增量分布与注水孔附近煤体内水分增量分布相同。

2) 随时间推移,煤体内水分增量的上升速度降低。24 h 后,煤体内水分增量的增速较注水初期下降明显。12 h 后,煤体内平均含水量约 $0.95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;24 h 后,煤体内平均含水量约 $0.116 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;36 h 后,煤体内平均含水量约 $0.126 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;48 h 后,煤体内平均含水量约 $0.133 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

3) 与注水孔相交裂隙附近的煤体内,水分运移的主要动力为注水压力,其内部水分增量的平均增速在注水前期较高,随时间推移逐渐放缓;其他裂隙附近的煤体内,水分运移的主要动力为毛细作用力,其内部水分增量的平均增速在注水前期较低,但增速较为稳定。且 48 h 后,两类裂隙附近煤体内的水分增量已较为接近,均约为 $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由此可推断,长时间注水后,毛细作用力对增加煤体润湿效果的影响高于注水压力。

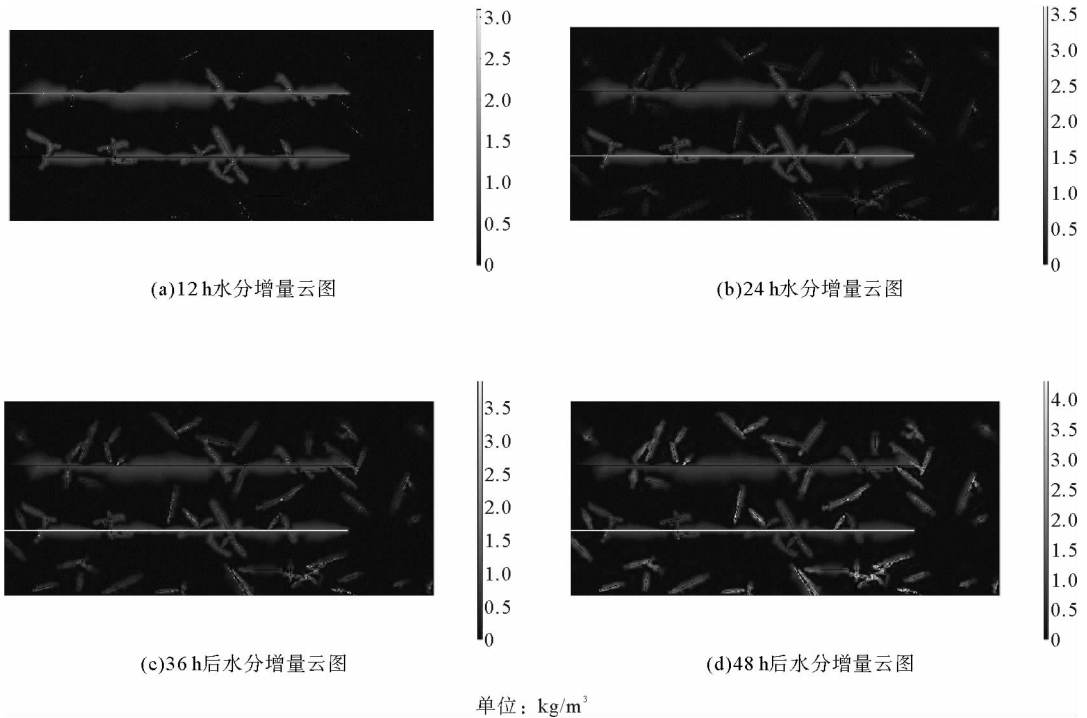


图 5 水分增量分布

Fig. 5 The distribution of amounts of moisture increment

4 结论

通过 COMSOL 与 MATLAB 联合仿真,模拟煤体内复杂裂隙对煤层注水过程中水分渗流压力场、速度场与水分增量的分布及变化情况,得出结论有:

1) 压力场以注水孔为轴心向外梯度下降,在距注水孔约 5 m 外消耗殆尽。与注水孔发生交叉的裂隙起到延伸水压作用范围的效果,此类裂隙附近的平均水压接近注水压力。

2) 速度场在大量裂隙的影响下表现出较高的离散性,水分渗流范围以注水孔为轴心扩散,速度以注水孔为轴心递减,且整体渗流速度趋向均衡,各区域渗流速度差距明显减小。

3) 与注水孔相交裂隙附近煤体内,水分运移的主要动力为注水压力,这部分煤体内水分增量的平均增速在注水前期较高,随时间推移逐渐降低;未与注水孔相交裂隙煤体内,水分运移的主要动力为毛细作用力,这部分煤体内水分增量的平均增速在注水前期较低,但增速较为稳定。长时间注水后,由于水压作用消耗殆尽,使得毛细作用力对提升煤体润湿效果的影响高于注水压力对提升煤体润湿效果的影响。

4) 模拟结果表明煤体内部的大量复杂裂隙、尤其是与注水孔交叉的裂隙,通过延伸注水孔的作用范围,进而扩大润湿区域,改善润湿效果。因此可考虑在采动裂隙较多的区域进行煤层注水作业,以保证煤体润湿效果。

参考文献:

- [1]周刚,程卫民,宋宪明,等.兖州及济东煤田煤层注水试验研究[J].煤炭科学技术,2006,34(3):56-61.
ZHOU Gang,CHENG Weimin,SONG Xianming et al. Research on water injection test in seam of Yanzhou and Jidong coal fields[J]. Coal Science and Technology,2006,34(3):56-61.
- [2]刘忠锋,康天合,鲁伟,等.煤层注水对煤体力学特性影响的试验[J].煤炭科学技术,2010,38(1):17-19.
LIU Zhongfeng,KANG Tianhe,LU Wei, et al. Experiment on water injection affected to mechanics features of coal body [J]. Coal Science and Technology,2010,38(1):17-19.
- [3]于岩斌,周刚,陈连军,等.饱水煤岩基本力学性能的试验研究[J].矿业安全与环保,2014,41(1):4-7.
YU Yanbin,ZHOU Gang,CHEN Lianjun, et al. Experimental study on basic mechanical properties of water-saturated coal [J]. Mining Safety & Environmental Protection,2014,41(1):4-7.
- [4]周刚,于岩斌,文金浩.深井条带面高压逾裂煤层注水模拟与卸压应用[J].矿业安全与环保,2015,42(2):6-11.
ZHOU Gang,YU Yanbin,WEN Jinhao. Simulation of water infusion in deep strip working face by high-pressure gradual splitting and its application in stress relief[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2015,42(2):6-11.
- [5]王维虎.煤层注水防尘技术的应用现状及展望[J].煤炭科学技术,2011,39(1):56-61.
WANG Weihu. Application present status and outlook of seam water injection dust control technology[J]. Coal Science and Technology,2011,39(1):56-61.
- [6]罗平平,李志平,范波,等.倾斜单裂隙宾汉浆液流动模型理论研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2010,29(1):43-47.
LUO Pingping,LI Zhiping,Fan Bo, et al. Theoretical study on flow model for tilted single fracture Binghamian Grouts[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2010,29(1):43-47.
- [7]熊祥斌,张楚汉,王恩志.岩石单裂隙稳态渗流研究进展[J].岩石力学与工程学报,2009,28(9):1839-1847.
XIONG Xiangbin,ZHANG Chuhan,WANG Enzhi. A review of steady state seepage in a single fracture of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(9):1839-1847.
- [8]张明璐,赵同彬,姚旺.考虑水压影响的M-C准则修正及数值模拟[J].山东科技大学学报(自然科学版),2015,34(2):19-24.
ZHANG Minglu,ZHAO Tongbin,Yao Wang. M-C criterion modification and numerical simulation with the consideration of effects of hydraulic pressure[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2015,34(2):19-24.
- [9]张士川,郭惟嘉,孙文斌,等.高水压底板突水通道形成与演化过程[J].山东科技大学学报(自然科学版),2015,34(2):25-29.
ZHANG Shichuan,GUO Weijia,SUN Wenbin, et al. Formation and evolution process of floor water-inrush channel under high water pressure[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2015,34(2):25-29.
- [10]王志生.煤层注水渗流特性研究及数值模拟分析[D].淮南:安徽理工大学,2011.
- [11]黄新杰.煤层注水湿润半径的数值模拟研究[D].淮南:安徽理工大学,2007.

(责任编辑:吕海亮)