

文章编号: 1001-1986(2020)06-0109-07

# 基于 X 形真实裂隙通道的煤层瓦斯渗流模拟

苏政睿<sup>1</sup>, 韦善阳<sup>1,2</sup>

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 贵州省非金属矿产资源综合利用重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 使用常规 X 射线或 CT 扫描进行图像处理, 研究裂隙结构时, 主裂隙不易提取, 其特征不明显, 不能直接反映主裂隙构造与流体速度关系。运用高清相机拍摄井下煤壁 X 形真实裂隙进行数字化处理, 并运用 AutoCAD 软件提取裂隙特征, 将图片矢量化导入 Comsol Multiphysics 仿真模拟软件进行计算, 模拟得到瓦斯分布压力场和渗流速度场云图。结果表明: 含 X 形裂隙煤样中, 瓦斯自入口开始, 渗流压力从左至右递减, 裂隙通道内瓦斯压力均匀分布, 是一段压力缓冲区; 非裂隙区渗流速度场分布不均匀, X 形裂隙支流处较汇流处瓦斯渗流更为活跃, 瓦斯的流向和裂隙走向的夹角对渗流速度有明显的影响, 瓦斯自下边界流入时的最大渗流速度是自左边界流入的 29.5 倍; 裂隙通道内的渗流速度与裂隙的尺度成单调递减对数函数关系, 裂缝尺度越大, 达西渗流速度越低, 当裂隙尺度为 0.68~1.23 mm 时对渗流速度影响最明显。研究成果可直观地了解煤裂隙内瓦斯渗流特征。



**关 键 词:** X 形裂隙; 瓦斯渗流; 数值模拟; 数字图像识别; 裂隙通道

移动阅读

**中图分类号:** TD163    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2020.06.015

## X-shaped real fracture channels-based simulation of coal seam gas seepage

SU Zhengrui<sup>1</sup>, WEI Shanyang<sup>1,2</sup>

(1. Mining College, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Non-metallic Mineral Resources in Guizhou Province, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In the study of fracture structure, the image processing with conventional X-ray or CT scanning will be accompanied by a large number of secondary fractures, and the main fracture characteristics are not obvious, which can not directly reflect the relationship between fracture structure and fluid velocity. High definition camera is used to take X-shaped real cracks in coal wall for digital processing, and the characteristics of fractures are extracted by CAD software, and the images are vectorized into the model, the distribution nephogram of seepage velocity field and seepage pressure field is obtained by simulating software. The results show that from the entrance, the seepage pressure decreases from the left to the right, are evenly distributed in the fracture channels, the fracture area fully releases the pressure, which is a pressure buffer zone; the distribution of seepage velocity field in the rock mass is uneven, the seepage in the tributary area is more active than that in the confluence area, and the angle between the gas flow direction and the fracture direction has obvious influence on the seepage velocity. The maximum seepage velocity of gas in the same flow direction is 29.5 times. There is a logarithmic function relationship between the seepage velocity in the fracture channel and the fracture size. When the fracture size is 0.68-1.23 mm, the seepage velocity is most obvious. The research results could be used to understand the characteristic of gas seepage flow in coal fractures intuitively.

**Keywords:** X shape crack; gas seepage; numerical simulation; digital image recognition; slit channel

煤储层裂隙是瓦斯运移和储集的主要通道, 所

以其几何特征与渗流作用之间的相互影响对于瓦

收稿日期: 2020-07-13; 修回日期: 2020-10-22

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2019]2887 号)

Foundation item: Science and Technology Program of Guizhou Province(Qiankehezhicheng[2019]2887)

第一作者简介: 苏政睿, 1997 年生, 男, 云南昆明人, 硕士研究生, 专业为矿业工程. E-mail: 2658582981@qq.com

引用格式: 苏政睿, 韦善阳. 基于 X 形真实裂隙通道的煤层瓦斯渗流模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(6): 109-115.

SU Zhengrui, WEI Shanyang. X-shaped real fracture channels-based simulation of coal seam gas seepage[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(6): 109-115.

斯抽采有重要影响<sup>[1-2]</sup>。当前国内已有大量学者综合各类常规和非常规的技术对煤储层孔隙进行精细化和微观化的定量表征,如使用 CT 扫描以及 X 光研究裂隙的主要发育方向<sup>[3-4]</sup>、宽度<sup>[5-6]</sup>、长度<sup>[7]</sup>、倾角<sup>[8-9]</sup>对煤体渗流造成的影响;同时也有学者运用三维分形模型<sup>[10-11]</sup>、Boltzmann 方法<sup>[12]</sup>、BBM-DEM 模型<sup>[13]</sup>、LBM 模拟<sup>[14]</sup>、多物理场耦合模型 Multiphysics<sup>[15-16]</sup>等手段研究煤体的渗流特征。这些研究表明,煤层中的裂隙网络是影响煤层渗透率的重要因素,煤层中的裂隙网络分布由若干细小的裂隙通道组成,瓦斯沿煤层走向流动时,会在裂隙处产生裂隙流,并在裂隙通道内形成速度不均匀的达西渗流场。因此,不考虑裂隙网络的渗流模拟研究将与实际产生一定偏差。裂隙网络<sup>[17]</sup>是一种分布杂乱的非均质结构,用传统的测量手段和统计方法很难真实准确地反映裂隙的分布规律和物理参数,需要借助图像数字识别的方法来提取岩体中裂隙特征和结构。学者<sup>[18-19]</sup>基于数字图像识别,结合模拟软件对瓦斯的渗流规律做出研究,其中存在的问题是 CT 和 X 光难以对图像进行后处理,并单独提取主干裂隙的特征,这导致很多次生的微小裂隙同时出现在画面中,致使在数值模拟运算中难以设置边界条件和网格,严重影响工程单元的计算量与计算时间,甚至部分复杂裂隙网格无法进行有限元计算。采用 CT 扫描及 X 光等技术采集的岩体图像的另一个缺点是,这类图像以灰度信息为主<sup>[20]</sup>,裂隙区域的灰度和邻近背景区域灰度接近,造成裂隙识别难度较大。

基于前人的研究基础和现存不足,笔者利用高清相机拍摄煤壁裂隙,通过 AutoCAD 软件对 X 形裂隙的主要裂隙特征和结构后处理,提取并转化为矢量图片,并与有限元计算相结合,准确反映主干裂隙通道的分布情况,在弱化消除次生裂隙的几何影响下,节省多物理场耦合模型软件的计算量,可较真实反映瓦斯在裂隙中的流动规律,进一步研究宏观裂隙尺度与渗流速度相关性,以期为瓦斯抽采实践提供基础理论依据。

## 1 仿真模拟与图像采集

### 1.1 模拟条件

运用 Comsol Multiphysics 多物理场耦合模型软件进行仿真模拟时,无法与真实环境做到完全匹配,所以需要设定合理的条件让模型贴近真实并且便于计算和模拟。参考文献[21]并结合井下实际情况,构建模型时假设条件为:煤体为裂隙域和非裂隙域,且在各区域内,煤体为非均质连续介质;模型中瓦

斯从左边界进入,从右边界流出;不考虑裂隙中的流固耦合,即瓦斯流动对裂隙造成的形变;瓦斯流动时整体温度不变,煤体裂隙内各向同性;瓦斯在煤裂隙中流动遵循达西渗流理论<sup>[22]</sup>。

### 1.2 图像处理

煤样图片采集设备为 ZHS2400 矿用本安型防爆数码单反照相机,配备防爆闪光灯,ISO 的感光度为 100~12 800,自带镜头为 18~55 mm 标准的变焦镜头。

图 1 为使用防爆照相机在某矿井下拍摄的真实裂隙照片,照片取材于 14 采区 12 号煤层,该煤层测定瓦斯压力为 1.44 MPa。拍摄时相机调整曝光度为 9 800。选取有代表性的 X 形裂隙位置进行拍摄,相机的有效像素为 2 470 万。



图 1 裂隙高清照片

Fig.1 High-definition picture of fissure

图 2 为实物处理后数字图像,提取出图 1 中清晰的 X 形主裂隙,并将该裂隙转换为矢量图片,以便于在模拟软件中建模,数字图片处理步骤如下。

运用 Windows 照片编辑功能对原始的高清裂隙图片进行预处理,将 X 形裂隙放大为图片中心,设置图片亮度为 85,颜色 23,晕影 13,清晰度为 100。去除图片噪声后保存副本。

打开 AutoCAD 软件,将处理好的图像以光栅格式插入,运用多段线对图像边界进行拟合提取特征,主要保留主裂隙区域的边界曲线,省略微小的次生裂隙。

拟合完成后,用图片转换软件转为矢量格式,保存为 DXF 的格式并导入 Comsol Multiphysics 多物理场耦合模型软件。



图 2 AutoCAD 提取特征曲线拟合的重构裂隙

Fig.2 Reconstructed fissures of the characteristic curve fitting extracted by AutoCAD

## 2 数值模拟

### 2.1 模型建立

将数字图像处理后的真实裂隙导入模拟软件中, 设置修复容差后重构裂隙, 模型如图3所示, 由图中可知, 裂隙模型被分成网格化形式, 每个格子内的边长为2 mm, 其中裂隙所在煤样面积为4 532 mm<sup>2</sup>。

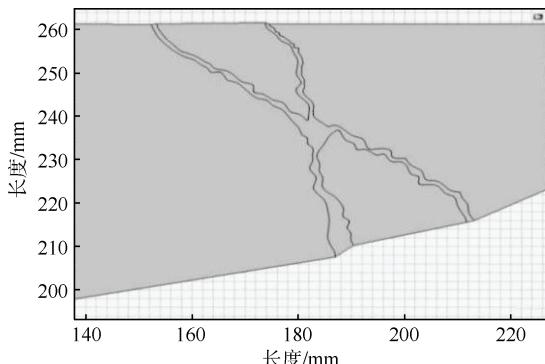


图3 裂隙模型

Fig.3 Fracture model

使用数值模拟软件多物理场耦合模型中达西定律模块中的裂隙流进行计算, 其适应条件是岩土达西渗流定律。裂隙处的边界设置为裂隙流, 模型上下边界均为无流体流动的壁面无位移边界, 参考文献[19]、文献[22]设置计算边界和参数(表1)。与前人参数设置不同的是, 本次设置了初始压力0.1 MPa和考虑实际井下瓦斯压力1.44 MPa; 另外, 在煤层右边界设置流出速度为一个随时间递减的函数, 设置研究模型为瞬态研究, 时步为10 s, 整个过程共1 000 s。

表1 数值模拟计算参数设置

Table 1 Parameter setting for the numeric modeling calculation

参数	左边界	右边界
压力 $p/\text{Pa}$	$10^5$ $1.44 \times 10^6$	$10^5 - 50t^{1/9}$ $1.44 \times 10^6 - 10^3t^{1/9}$
开始时间 $t_0/\text{s}$	0	0
全时间 $t/\text{s}$	1 000	1 000
起始压力 $p_0/\text{MPa}$	1.44	1.44
渗透率(裂隙)/ $\text{m}^2$	$3.47 \times 10^{-9}$	$3.47 \times 10^{-9}$
渗透率(非裂隙)/ $\text{m}^2$	$10^{-12}$	$10^{-12}$
瓦斯密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	0.714	0.714
瓦斯黏度/( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	$1.08 \times 10^5$	$1.08 \times 10^5$
温度/K	273.15	273.15

### 2.2 模拟结果与分析

#### 2.2.1 瓦斯压力分布模拟分析

图4为模拟瓦斯自左边界进入, 流经裂隙区域

B, 最后从右边界流出过程中瓦斯压力的变化过程。由图中可知, 裂隙区域B和非裂隙区域A、C中, 瓦斯压力分布不同, 总体上从左往右瓦斯压力呈单调递减的变化状态。当初始瓦斯压力为0.1 MPa时(图4a), 左边界入口处最大瓦斯压力为0.1 MPa, 右边界出口处最小瓦斯压力为0.05 MPa。在裂隙区域B内, 瓦斯压力的变化范围在0.075~0.080 MPa; 当初始瓦斯压力为1.44 MPa时(图4b), 左边界入口处最大瓦斯压力为1.44 MPa, 右边界出口处最小瓦斯压力为0.44 MPa, 裂隙区域B内瓦斯压力为0.9~1.0 MPa。对比图4a和图4b可知, 不同初始瓦斯压力设置并未对整个模拟煤样中的瓦斯压力分布产生影响, 这与文献[22]得出的结论一致。

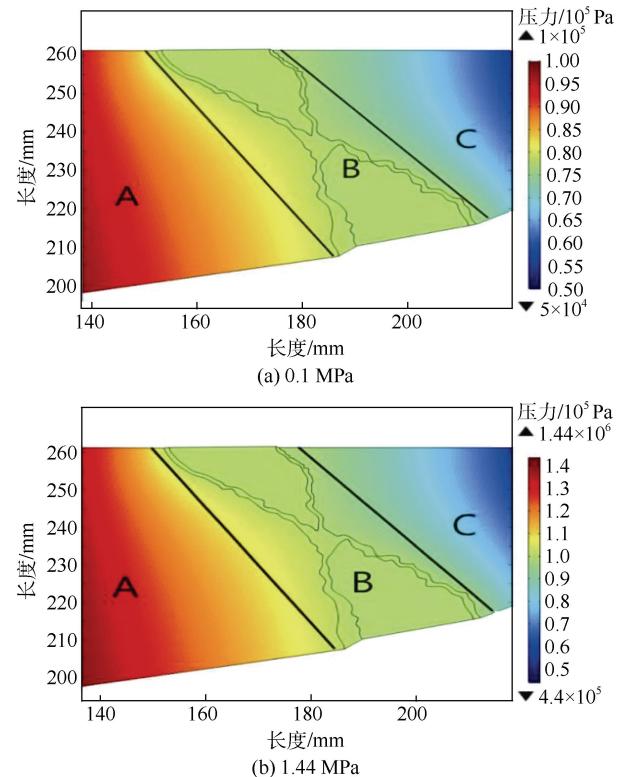


图4 瓦斯压力分布云图( $t=1 000 \text{ s}$ )

Fig.4 Cloud picture of pressure distribution

为了直观地对比在同一个煤样中, 有裂隙区域与无裂隙区域中流体的瓦斯压力随时间的变化趋势, 绘制了图5。

如图5中显示, 在250 s时, A、B、C 3个区域之间的瓦斯压力梯度不明显, 瓦斯压力最高处与最低处仅差0.2 MPa。以250 s为间隔, 当计算达到1 000 s时可以观察到A、C区域的瓦斯压力梯度明显增大, 瓦斯压力最高处与最低处相差1 MPa, 瓦斯压力高度图的坡度变陡; 裂隙区域B处的瓦斯压力在不同时刻均处于同一高度, 瓦斯压力分布均匀,

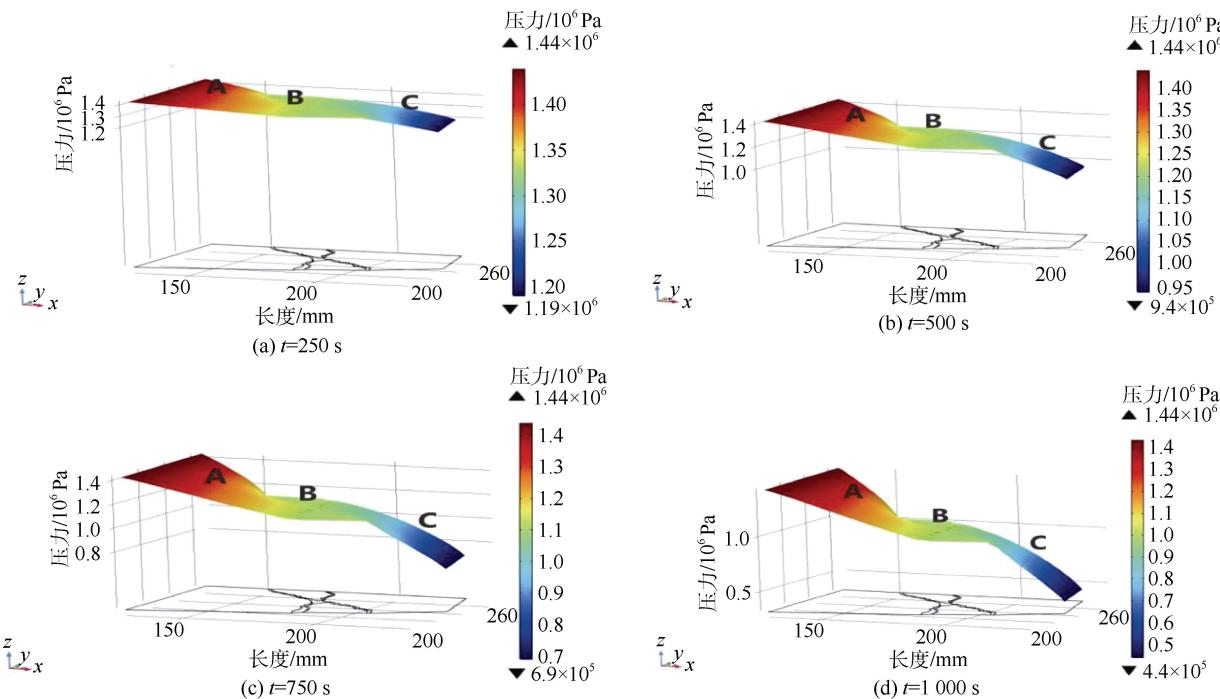


图 5 1.44 MPa 瓦斯压力下不同时刻的压力高度图

Fig.5 The pressure height chart of different time under gas pressure of 1.44 MPa

高度从 1.3 MPa 下降到 1.0 MPa, 这与文献[23]得出的“裂隙剖面上瓦斯压力近乎不变”相一致。

图 5 表明, 裂隙区域 B 对瓦斯压力的变化有抑制作用, 区域 A、C 瓦斯压力随时间变化较明显, 造成这个现象的原因为: B 区裂隙通道中的空隙明显大于非裂隙区域处, 流体的容积增大, 压力梯度变小, 且裂隙走向与瓦斯流入的方向呈夹角相交, 受煤体构造影响, 瓦斯压力在此处的变化并不明显; A 区瓦斯压力变化是受其右边界接壤裂隙影响, 瓦斯流入裂隙中, 造成泄压, 瓦斯压力明显降低; C 区域临近瓦斯的出口, 是 3 个区域中瓦斯压力变化最明显的区域, 由图 4 也可看到右侧出口处的煤样宽度小于左侧入口处, 瓦斯压力在更小的“管径”中会产生更大压力梯度, 导致 C 区瓦斯压力变化略高于 A 区。

## 2.2.2 渗流场分布模拟分析

图 6 模拟了 0.1 MPa 和 1.44 MPa 两种压力下瓦斯自左边界进入, 流经裂隙区域 B, 最后从右边界流出过程中达西速度场的演变过程, 图 7 模拟了 1.44 MPa 下瓦斯自左边界进入和自下边界进入的达西速度场, 显示在同一裂隙通道内支流处的速度场分布与汇流处速度场的分布对比, 模拟了裂隙通道中瓦斯流向与裂隙走向的关系对渗流场的影响。图 8 直观地对比瓦斯从不同边界流入的最大渗流速度随时间的变化情况。

如图 6 所示, 瓦斯在裂隙区域内外的流动规律

为: 非裂隙区域处的流场分布均匀, 方向由左往右, 流速大小分布对称, 渗流速度最大值出现在两处红色圆圈标记区域, 其中, 左上角渗流活跃区域是瓦斯入口处与裂隙最近区域, 流体从此处进入裂隙路程最短, 动能消耗最少; 右下角渗流活跃区域处离瓦斯出口最近, 速度场分布是周围流域的最大值。

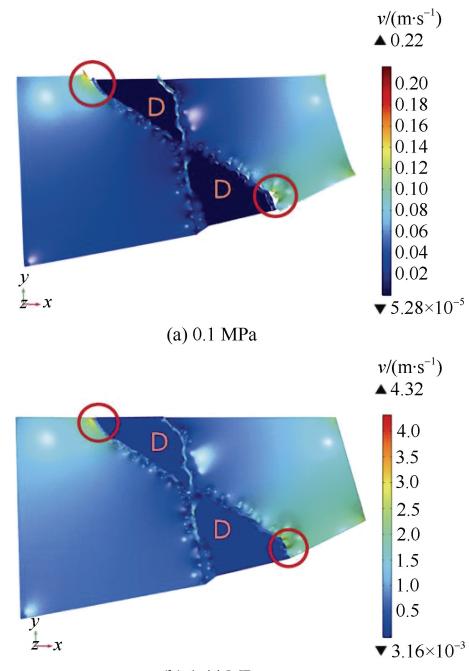
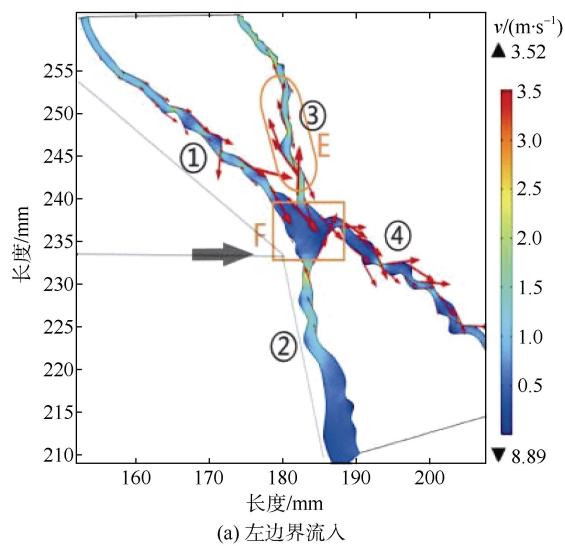
图 6 不同初始压力条件下瓦斯压力达西速度场( $t=1000$  s)

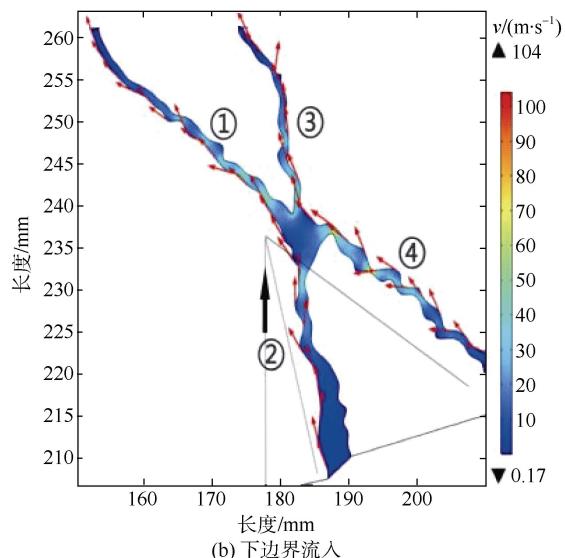
Fig.6 Darcy velocity field of gas pressure under different initial pressures

不同初始瓦斯压力只影响渗流速度的大小, 并未改变整个煤样内的渗流分布。被裂隙通道包围的区域 D, 是整个瓦斯渗流速度场中数值最小区域。由于煤体属于双重孔隙介质系统, 裂隙通道处孔隙率小, 渗透率大, D 区域煤的孔隙率大渗透率小, 瓦斯在裂隙通道内流动的阻力小于进入 D 区域的阻力。

设置瓦斯分别从左边界和从下边界流入, 截取裂隙通道处模型, 计算两种条件下瓦斯渗流速度, 如图 7 和图 8 所示, 由图中可以看出:



(a) 左边界流入



(b) 下边界流入

注: 线上箭头表示达西速度场; 初始压力  $p_i=1.44 \text{ MPa}$ ; 时间  $t=1000 \text{ s}$

图 7 从不同边界流入时瓦斯压力达西速度场

Fig.7 Darcy velocity field of gas flowing from different boundaries

当瓦斯自左边界流入, X 形相交处 F 区域为裂隙通道内的汇流处, 达西速度小于各支流。区域①—④属于裂隙网络中的优势水力路径, 入口出口对应图 6 中红圈标记位置, 线上达西箭头密集于这条路

径; 在支流 E 区域处发生部分逆流, 且达西渗流场最为活跃, 这说明在汇流处各支流相遇后动能产生消耗, 不同方向的速度分量相互抵消,  $y$  方向速度场较大的支流②在汇集后于另一支流③处产生逆流。

当瓦斯自下边界流入, 渗流场分布均匀, 各支流内达西速度场箭头指向顺沿裂隙走向, 渗流活跃区集中在支流汇入中心前的一段路径; 渗流速度较瓦斯自左侧流入有明显增大, 图中黑色箭头代表瓦斯流向, 瓦斯流向与裂隙走向夹角越小, 渗流速度越大, 当计算进行到 1000 s 时, 自下边界流入时最大渗流速度是自左边界流入的 29.5 倍。

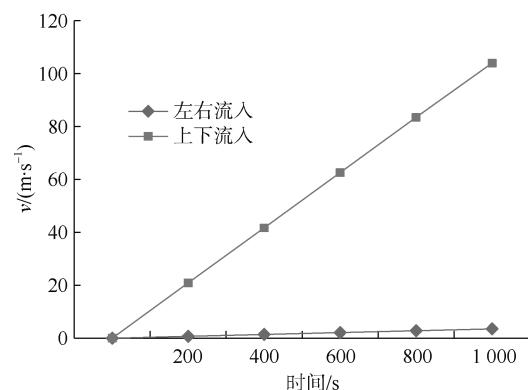


图 8 不同边界流入最大瓦斯渗流速度随时间变化

Fig.8 Time-dependent diagram of maximum inflow velocity at different boundaries

为了直观地对比不同裂隙尺度对达西速度场的影响, 以 1.44 MPa 初始瓦斯压力为例, 从数据库中导出支流②中(图 7)裂隙尺度位置坐标点(图 9), 并导出各点渗流速度数据绘制成散点图(图 10)。

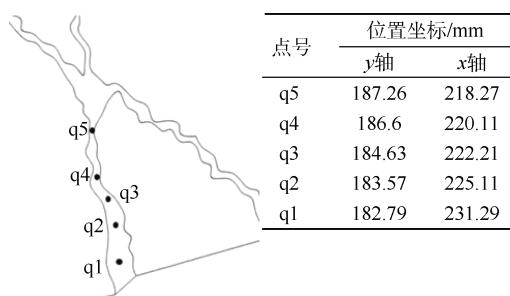


图 9 支流处裂隙测点及位置坐标

Fig.9 Selection and the position coordinates of the measurement points of the fractures at the tributaries

由图 10 可得, 对比不同方向流入瓦斯的拟合曲线, 渗流速度随裂隙尺度单调递减; 裂隙尺度为 0.68~1.23 mm 时, 渗流速度变化最为明显; 裂隙尺度在 2.74~3.23 mm 范围时, 对渗流速度的影响降到最低。每个尺度之间相差 0.5 mm 左右, 且在同一通道内, 渗透率相差微小, 渗流速度与裂隙尺度大小成反比。王录合等<sup>[23]</sup>研究得出, 岩石裂隙中的渗流场

分布不均, 渗流活跃的通道主要为裂隙串通的通道, 在单个裂隙中, 宽度较窄的裂隙中流速较高且单个裂隙中测点的渗流速度与测点距壁面的距离符合二次函数关系。这与本文模拟实验得到的认识一致。

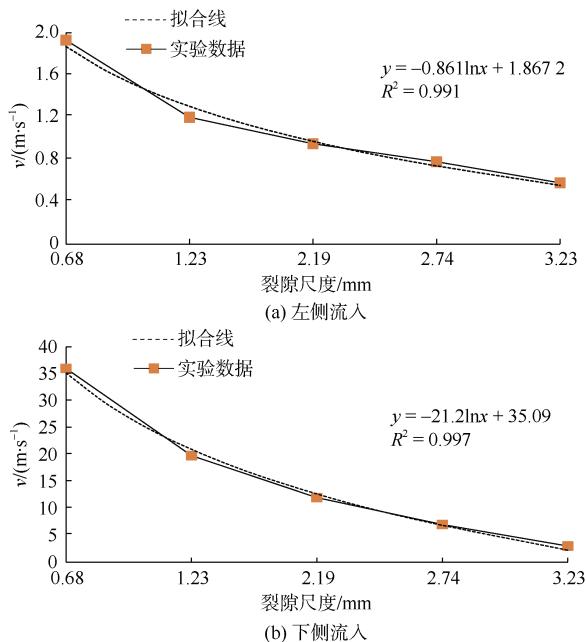


图 10 渗流速度随裂隙宽度变化(横轴各点位置见图 9)  
Fig.10 Variation of seepage velocity with fracture width

### 3 结论

a. 含有 X 形裂隙的煤样区域内, 自左至右瓦斯压力单调递减, 裂隙区域内是煤层压力分布的一段缓冲区, 且瓦斯压力梯度最小。X 裂隙叉形交汇右边界处瓦斯压力变化显著。

b. 瓦斯自左边界流入时, X 裂隙叉形交汇点上下区域内达西渗流场速度最小, 裂隙通道内形成支流与汇流区, 支流处比汇流区的达西渗流场活跃, 当某支流在纵向上的速度分量大于另一处支流时, 会发生逆流现象。

c. 对于 X 形裂隙, 当瓦斯自下边界流入煤样时, 其渗流速度明显大于自左边界流入, 且所有支流内速度场方向顺沿裂隙走向, 在计算进行至 1 000 s 时下边界流入时的最大渗流速度是左边界流入的 29.5 倍。

d. 渗流速度和裂隙尺度成单调递减函数关系, 裂缝尺度越大, 达西渗流速度越低。瓦斯渗流速度与尺度成对数关系, 拟合度较高。

请听作者语音介绍创新技术成果  
等信息, 欢迎与作者进行交流

### 参考文献(References)

[1] 宋晓夏, 唐跃刚, 李伟, 等. 基于显微 CT 的构造煤渗流孔隙

细表征[J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 435–440.

SONG Xiaoxia, TANG Yuegang, LI Wei, et al. Advanced characterization of seepage pores in deformed coals based on micro-CT[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 435–440

- [2] 许江, 袁梅, 李波波, 等. 煤的变质程度、孔隙特征与渗透率关系的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 681–687.  
XU Jiang, YUAN Mei, LI Bobo, et al. Experimental study of relationships between metamorphic grade, pore characteristics and permeability of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 681–687
- [3] 张驰, 高新宇, 王森, 等. 煤层裂隙发育方向对瓦斯抽采效果影响的实验研究与应用[J]. 煤炭工程, 2020, 52(2): 96–100.  
ZHANG Chi, GAO Xinyu, WANG Sen, et al. Experimental study and application of the influence of fracture development direction of coal seam on gas extraction effect[J]. Coal Engineering, 2020, 52(2): 96–100.
- [4] 钟志彬, 邓荣贵, 孙怡, 等. 流纹岩天然裂隙网络几何特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 167–174.  
ZHONG Zhibin, DENG Ronggui, SUN Yi, et al. Geometric characterization of natural crack network in rhyolite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1): 167–174.
- [5] 刘德旺, 刘洋, 赵春虎, 等. 泥岩全破坏过程中渗透特性试验研究[J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(1): 78–82.  
LIU Dewang, LIU Yang, ZHAO Chunhu. Experimental study on the characteristics of permeability in the all failure process of mudstone[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2015, 35(1): 78–82.
- [6] 陈彦君, 苏雪峰, 王钧剑, 等. 基于 X 射线微米 CT 扫描技术的煤岩孔裂隙多尺度精细表征: 以沁水盆地南部马必东区块为例[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(5): 66–72.  
CHEN Yanjun, SU Xuefeng, WANG Junjian, et al. Multi-scale fine characterization of coal pore-fracture structure based on X-ray micro-CT scanning: A case study of Mabidong Block, southern Qinshui Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(5): 66–72.
- [7] 何凯凯. 基于 CT 表征煤中多尺度孔裂隙发育特征[D]. 焦作: 河南理工大学, 2018.  
HE Kaikai. Characterization of multiscale pores and fissures in coal based on CT scan[D]. Jiaozuo: Henan university of science and technology, 2018.
- [8] 倪绍虎, 何世海, 汪小刚, 等. 裂隙岩体渗流的优势水力路径[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(6): 108–115.  
NI Shaohu, HE Shihai, WANG Xiaogang, et al. Preferential flow pathways in fractured rock mass[J]. Journal of Sichuan university(Engineering Science Edition), 2012, 44(6): 108–115.
- [9] 胡少斌. 多尺度裂隙媒体气固耦合行为及机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.  
HU Shaobin. Study on gas-solid coupling behavior and mechanism of multi-scale fracture coal[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [10] 王登科, 魏强, 魏建平, 等. 煤的裂隙结构分形特征与分形渗流模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(1): 103–10.  
WANG Dengke, WEI Qiang, WEI Jianping, et al. The fractal characteristics of fissure structure of coal and the fractal perme-



OSID 码

- ability model research[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(1): 103–109.
- [11] 王登科, 曾凡超, 王建国, 等. 显微工业CT的受载煤样裂隙动态演化特征与分形规律研究[J/OL]. 岩石力学与工程学报: 1–10[2020-05-06].
- WANG Dengke, ZENG Fanchao, WANG Jianguo, et al. Fractal characteristics of fracture structure and fractal seepage model of coal[J/OL]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering: 1–10[2020-05-06].
- [12] 王鹏宇. 基于格子 Boltzmann 方法岩体微裂隙渗流特性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- WANG Pengyu. Study on seepage characteristics of micro-fracture in rock mass based on lattice Boltzmann method[D]. Kunming: Kunming university of science and technology, 2019.
- [13] 程志恒, 苏士龙, 汪昕. 近距离煤层采动裂隙场 BBM-DEM 模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(12): 1–9.
- CHENG Zhiheng, SU Shilong, WANG Xin. Study on mining-induced fracture field of contiguous coal seam with BBM-DEM simulation[J]. Journal of coal science and technology, 2019, 47(12): 1–9.
- [14] 张钦刚. 煤岩粗糙裂隙结构渗流性质的实验与 LBM 模拟研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
- ZHANG Qinggang. LBM-based numerical study and experimental investigation on the permeation behavior in fractured coal rock[D]. China University of Mining & Technology(Beijing), 2016.
- [15] 刘永茜. 媒体瓦斯运移的容阻效应分析[J]. 煤矿安全, 2019, 50(7): 5–9.
- LIU Yongqian. Capacitive resistance effect analysis of gas migration in coal[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(7): 5–9.
- [16] 李娜, 任理. 连续时间随机游动理论模拟多孔介质中溶质运移的研究进展[J]. 水科学进展, 2012, 23(6): 881–886.
- LI Na, REN Li. Continuous time random walk theory research progress of solute transport in porous media[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(6): 881–886.
- [17] 付裕, 陈新, 冯中亮. 基于CT扫描的煤岩裂隙特征及其对破坏形态的影响[J]. 煤炭学报, 2020, 45(2): 568–578.
- FU Yu, CHEN Xin, FENG Zhongliang. Characteristics of coal-rock fractures based on CT scanning and its influence on failure modes[J]. Journal of China Coal Society, 2020, (2): 568–578.
- [18] 孙月龙, 崔洪庆, 关金锋. 基于图像识别的煤层井下宏观裂隙观测[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(5): 19–22.
- SUN Yuelong, CUI Hongqing, GUAN Jinfeng. Image recognition-based observation of macro fracture in coal seam in underground mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(5): 19–22.
- [19] 马天然, 刘卫群, 陈兴. 基于图像识别的裂隙煤层气非 Darcy 渗流模拟[J]. 力学季刊, 2013, 34(3): 494–500.
- MA Tianran, LIU Weiqun, CHEN Xing. Simulation of non-darcy gas flow in image-recognized real coal-bed fractures[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2013, 34(3): 494–500.
- [20] 刘勇, 崔洪庆. 基于裂隙形态特征的煤层图像裂隙识别研究[J]. 工矿自动化, 2017, 43(10): 59–64.
- LIU Yong, CUI Hongqing. Research on coal-bed image fractures identification based on fracture shape characteristics[J]. Industrial and Mining Automation, 2017, 43(10): 59–64.
- [21] 房新亮, 潘东. 不同钻孔抽采参数下瓦斯运移规律研究[J]. 能源与环保, 2019, 41(11): 43–46.
- FANG Xinliang, PAN Dong. Study on gas migration law under different borehole extraction parameters[J]. China Energy and Environmental Protection, 2019, 41(11): 43–46.
- [22] 盛金昌, 刘继山, 赵坚. 基于图像数字化技术的裂隙岩体非稳态渗流分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(7): 1402–1407.
- SHENG Jinchang, LIU Jishan, ZHAO Jian. Analysis of transient fluid flow in fractured rock masses with digital image-based method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(7): 1402–1407.
- [23] 王录合, 赵春孝, 姜振泉, 等. 基于数字图像及数值模拟的裂隙岩体渗透特征[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(1): 100–102.
- WANG Luhe, ZHAO Chunxiao, JIANG Zhenquan, et al. Permeability characteristics of fractured rock based on digital image and numerical simulation[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(1): 100–102.

(责任编辑 范章群)

(上接第108页)

- [14] 方鹏, 田宏亮, 邬迪, 等. ZDY6000LD(A)型履带式全液压定向钻机及其应用[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(2): 74–77.
- FANG Peng, TIAN Hongliang, WU Di, et al. Development and application of the track-mounted ZDY6000LD(A) hydraulic directional drilling rig[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(2): 74–77.
- [15] 陶云奇, 刘东, 许江, 等. 大尺寸复杂应力水力压裂裂缝扩展模拟试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(2): 405–412.
- TAO Yunqi, LIU Dong, XU Jiang, et al. Experimental study on hydraulic fracturing propagation in coal/rock with large size and complex stress[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2019, 36(2): 405–412.
- [16] 徐涛, 冯文军, 苏现波. 煤矿井下水力压冲增透强化抽采技术试验研究[J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(3): 303–306.
- XU Tao, FENG Wenjun, SU Xianbo. Experimental research on enhanced gas extraction application with hydraulic fracturing and flushing[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2015, 35(3): 303–306.
- [17] 秦玉金, 苏伟伟, 田富超, 等. 煤层注水微观效应研究现状及发展方向[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(3): 428–444.
- QIN Yujin, SU Weiwei, TIAN Fuchao, et al. Research status and development direction of microcosmic effect under coal seam water injection[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(3): 428–444.

(责任编辑 范章群)