

王刚,江成浩,刘世民,等. 基于CT三维重建煤骨架结构模型的渗流过程动态模拟研究[J]. 煤炭学报,2018,43(5):1390-1399. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1199

WANG Gang,JIANG Chenghao,LIU Shimin,et al. Dynamic simulation of seepage process based on CT 3D reconstruction of coal skeleton structure model[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(5):1390-1399. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1199

# 基于CT三维重建煤骨架结构模型的渗流过程动态模拟研究

王 刚<sup>1,2</sup>,江成浩<sup>2</sup>,刘世民<sup>3</sup>,褚翔宇<sup>2</sup>,沈俊男<sup>2</sup>

(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; 3. 宾夕法尼亚州立大学 地球与矿物科学学院,宾夕法尼亚州 16802)

**摘 要:**为了探究煤体微观结构中的渗流变化情况,以新疆大黄山气煤为研究对象,运用CT扫描和三维重建技术建立了含有孔裂隙的三维煤体骨架结构模型。在此基础上构建了一种能够反映动态渗流过程的流固耦合模型,并结合内置Navier-Stokes控制方程的ALE算法进行了渗流模拟。结果表明:渗流过程中,孔裂隙中每个点的流速都会存在一个速度峰值和稳定流速值;相较于裂隙结构,孔隙结构较差的连通性增大了其在模型前端的流体动能损耗,减缓了后续孔隙中流体的流动。初始流速影响了入水口处流速及流体密度的变化趋势,也改变了裂隙中速度峰值的变化规律,当初始流速值低于0.03 mm/s时,裂隙中速度峰值沿渗流方向呈现出“先增大后减小”的变化趋势,而当初始流速值大于0.03 mm/s时,速度峰值则沿着渗流方向逐渐减小。在低压力梯度条件下,孔裂隙的速度峰值与压力梯度之间存在非线性变化关系,而稳定流速值则随压力梯度的变化线性增大。研究成果为后续相关渗流影响因素的研究提供了一种新的思路。

**关键词:**CT;三维重建;孔裂隙结构;渗流;流固耦合模拟

**中图分类号:**P618.11 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2018)05-1390-10

## Dynamic simulation of seepage process based on CT 3D reconstruction of coal skeleton structure model

WANG Gang<sup>1,2</sup>,JIANG Chenghao<sup>2</sup>,LIU Shimin<sup>3</sup>,CHU Xiangyu<sup>2</sup>,SHEN Junnan<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. Department of Energy and Mineral Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, USA)

**Abstract:** In order to investigate the seepage change in the microstructure of coal, taking Xinjiang Dahuang Mountain's gas coal as an example, using CT scanning and 3D reconstruction technology, a 3D coal skeleton structure model with pores and fissures is established. On this basis, a fluid solid coupling model which can reflect the dynamic seepage process is constructed. Then combined with the ALE algorithm with Navier-Stokes control equation, the numerical simulation is carried out. The results show that in the process of seepage flow, there is a velocity peak and a steady flow velocity at the each point of the pores and fissures. Compared to the fracture structure, the poor connectivity of pore structure increases the loss of fluid kinetic energy at the front of the model and slows the flow of fluid in the following pores. The initial flow velocity affects the variation trend of flow velocity and fluid density at the inlet, and also

收稿日期:2017-08-31 修回日期:2017-12-11 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0805201);国家自然科学基金资助项目(51674158);山东科技大学杰出青年科技人才支持计划资助项目(2015JQJH105)

作者简介:王 刚(1984—),男,山东兰陵人,副教授,博士。E-mail:gang.wang@sdust.edu.cn

changes the peak velocity variation in the fracture. When the initial velocity is lower than 0.03 mm/s, the peak value of velocity in fractures shows a trend of “first increasing, then decreasing” along the seepage direction. When the initial velocity is greater than 0.03 mm/s, the velocity peak decreases along the direction of seepage. At low-pressure gradient condition, there is a nonlinear relationship between the velocity peak and the pressure gradient in the pore fracture structure, while the steady seepage value increases linearly with the increase of the pressure gradient. The results provide a new idea for the study of influencing factors of seepage in future research.

**Key words:** CT; three-dimensional reconstruction; pore fracture structure; seepage; fluid-solid coupling simulation

煤作为一种多孔介质岩石材料,内部除了固体基质外,还分布有大量结构不同、空间位置各异的孔裂隙结构,这使其形成了较为复杂的渗流特性。而渗流作为岩土工程中的重要现象之一,与煤矿日常生产中的煤层注水、底板突水防治、煤层气开采以及地下水资源保护等密切相关<sup>[1-3]</sup>。因此,针对煤体孔隙、裂隙结构开展相关渗流特征以及变化规律的研究,有助于解决上述工程中遇到的实际问题。

按照流体的状态可将渗流划分为气体渗流和液体渗流。虽然两者在影响因素、渗流现象等方面有所差异,但是采用的研究方法基本相同,主要包括:实验法<sup>[4-5]</sup>、理论分析法<sup>[6]</sup>以及数值模拟法<sup>[7-8]</sup>。数值模拟法因具有可重复性、不受外界环境影响以及能够模拟复杂工况条件等特点,逐渐成为了渗流研究中的热点<sup>[9-11]</sup>。

在渗流模拟中,能否正确地表示孔裂隙结构是影响模拟准度的重要因素。目前,裂隙岩体渗流分析中常采用的模型有3种<sup>[12]</sup>:等效介质模型、裂隙网络模型和双重介质模型。但是所构造出的结构与实际情况相比仍存在一定的差距。CT技术作为研究孔裂隙结构的一种新手段,可以在不损坏、不更改岩样内部结构信息的前提下,将其中的密度信息以可视化的形式表现出来,进一步结合三维重建可对孔裂隙类型、孔径结构分布和孔裂隙空间配置等进行精细定量表征。CT三维重建技术解决了普通的物理实验难以还原孔裂隙结构的问题,也为微细观尺度下岩石的单相流、多相流以及渗流参数变化规律等研究的开展提供了所需的介质模型。刘向君等<sup>[13]</sup>利用CT扫描技术建立了三维砂岩的数字岩芯模型,通过孔隙尺度的渗流模拟计算获得了砂岩的渗透率。GUNDE等<sup>[14]</sup>通过CT三维重建技术研究了砂岩孔裂隙中水、CO<sub>2</sub>的驱替渗流情况。JU等<sup>[15]</sup>基于砂岩孔隙结构CT图像,通过LBM方法分析了微细观孔隙结构中CH<sub>4</sub>的渗流性质以及孔隙结构对渗流造成的影响。对于煤体结构,学者们主要利用CT三维重建技术探究渗流通道的特征以及稳定状态下煤层气的运移、分布情况。YAO等<sup>[16]</sup>利用CT三维重建技术探究了孔隙、

裂隙和矿物的空间分布与渗透率之间的关系。宋晓夏等<sup>[17]</sup>和李玲等<sup>[18]</sup>通过显微CT技术对煤中的孔裂隙结构进行了表征,研究了其结构的连通性。王刚等<sup>[19]</sup>利用CT三维重建对煤层气的渗流情况进行了研究,得出在相同压力梯度下,渗流速度总的趋势随有效孔隙率、渗透率、非达西系数的增大而增大。NI等<sup>[20]</sup>通过CT扫描技术提取并构建了煤体等效孔隙网络模型,研究了大孔隙结构中的煤层气渗流情况,并发现在某些复杂的孔隙结构中不可避免地会出现气体停滞和不发生流动的现象。WANG等<sup>[21]</sup>在基于CT图像建立的煤体模型中预置了不同形状、不同角度的人工裂隙,分析了裂隙的空间几何形态和位置对瓦斯渗流的影响。

稳态渗流是上述煤体渗流模拟研究的前提。而实际的渗流是一个由不稳定到逐渐趋于稳定的动态变化过程。与稳态渗流不同,岩体中非稳态渗流的密度、速度等物理量不仅是空间的函数,还是时间的函数,这大大增加了三维数值模拟研究的难度。笔者运用CT三维重建技术建立了拥有孔裂隙的三维煤体骨架结构模型,结合HyperMesh前处理软件以及LS-DYNA模拟软件实现了对煤中液体基质动态渗流过程的模拟,在此基础上,通过设置不同的初始流速、压力梯度条件,探究了煤体孔隙、裂隙结构中的流体分布特征,分析了内部各点的流速与时间的变化规律,并结合建立的“稳定流速-压力梯度”关系对模型的渗透率进行了估算。

## 1 扫描实验及三维重建

使用ZEISS Xradia 510 Versa 3DX射线显微镜对新疆金塔大黄山气煤煤样进行CT扫描,煤样的水分为1.4%,灰分为10.24%,挥发分为24.54%。所选实验设备及煤样如图1(a),(b)所示。大量研究表明<sup>[17,22-23]</sup>:孔裂隙的结构特征对渗透性具有显著影响,当孔径小于1 μm时,由于毛细力、表面张力等力的作用,导致只有附加一个压力梯度,流体才能开始流动;而当其超出1 μm时,孔隙对煤体渗流的贡献最大。为了能在模拟中得到较为理想的渗流现象并

减少启动压力造成的影响,选用直径为9 mm的试样进行CT扫描,此时得到图像分辨率为 $9.5\ \mu\text{m}$ ,其能反映的最小孔隙尺寸为 $9.5\ \mu\text{m}$ ,能够满足上述研究要求。考虑到重建计算时间以及需要兼顾模拟孔隙、裂隙中的渗流情况,选取CT图像中含有一条裂隙宽度约为 $20\ \mu\text{m}$ 的局部区域进行三维重建,原始图像的大小为 $1\ 004\ \text{像素}\times 1\ 024\ \text{像素}$ ,选取的局部区域大小为 $80\ \text{像素}\times 80\ \text{像素}$ ,如图1(c),(d)所示。

阈值分割作为三维重建的重要步骤,其效果决定了重建后模型的质量。通过笔者之前的研究,选用DTM阈值分割法对该煤样CT图像进行阈值分割。其原理是通过将CT的灰度图像转化成数字地面模型,基于此对孔裂隙的体积 $V_E$ 、煤体的总体积 $V_T$ 进行表征,进而构建孔隙率 $\varphi(x)$ 与灰度值 $x$ 之间的变化函数,最终通过求取函数极小值的最大值确定CT图像的阈值<sup>[24]</sup>。通过计算,确定该图像的阈值为150灰度值,此时,对应的孔隙率为25%,分辨率为 $9.5\ \mu\text{m}$ ,可表征的最小孔隙尺寸为 $9.5\ \mu\text{m}$ 。采用基于Matlab语言的重建软件对煤体骨架结构进行三维重建。孔裂隙中含有一些孤立的颗粒杂质,为了保证流固耦合的质量,在三维重建中将这“孤岛”予以删除。重建模型如图1(e)所示,其孔裂隙结构形态较为复杂,主要呈现出圆柱状、圆锥状、球形等形态。由于去除了模型中的“孤岛”,导致其孔隙率为26%,略高于真实情况,但误差在5%以内,由此对结构造成的影响可忽略,故可用其进行后续模拟研究。

## 2 流固耦合模拟设置

### 2.1 流固耦合模型

将重建好的煤体骨架结构模型导入到拥有LS-DYNA程序接口的HyperMesh软件中进行流固耦合模型设置。笔者主要考虑初始流速、压力梯度两种因素对孔裂隙中渗流分布、流速变化的影响,为避免其他因素干扰,在流固耦合模型设置时对模拟条件进行合理假设。其基本假设包括:①流体为理想液态水,不会出现黏度变化;②流体在孔裂隙中的运动符合基本的渗流理论;③渗流过程中不会产生煤体结构的破坏损伤以及气体的吸附解吸。值得注意的是,由于所构建模型孔隙尺寸大于 $1\ \mu\text{m}$ ,此时孔隙的毛管力作用效果较小,在本模拟中可忽略不计。为了实现孔裂隙中流体渗流过程的动态模拟,将流固耦合模型设置成3个部分,即:水头、空气场、煤体骨架结构。其中,水头负责提供流体以及动能,空气场与煤的内表面耦合接触,成为流固耦合过程的主要场所。流固耦合模型如图2所示。

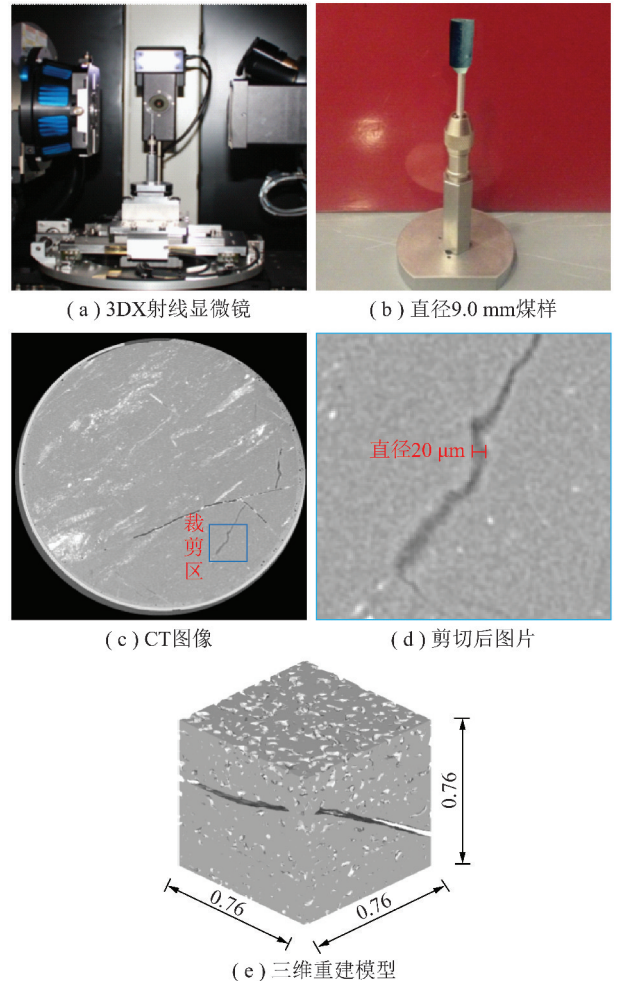


图1 CT扫描及三维重建模型

Fig. 1 CT scanning and 3D reconstruction model

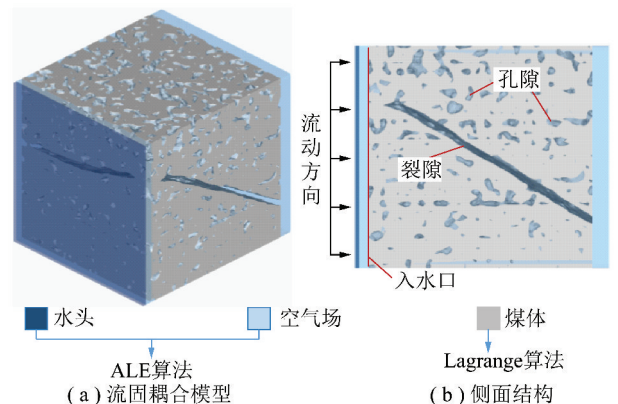


图2 流固耦合模型

Fig. 2 Fluid solid coupling model

由于笔者侧重于单一因素作用下煤体渗流规律的研究,因此,选用限制因素少、加载条件简单、渗流现象较为直观的单相水渗流作为该模拟的流动方式。规定流体只沿 $x$ 方向进行流动,而其余侧面不允许流体流出。因而在设置时,对煤体左右两面施加 $y,z$ 方向上的约束,4个侧面施加 $x,y,z$ 方向的约束。

### 2.2 单元格算法

算法作为数值模拟中解决问题的主要途径,会对模拟的设置、计算时长以及结果等造成影响。LS-DYNA 软件中常采用的算法有:Lagrange 算法、Euler 算法和 ALE 算法。它们具有不同的计算特点,见表 1<sup>[25]</sup>。由于本文不涉及流体对煤骨架结构的冲击破坏作用,因此,选用 Lagrange 算法作为煤骨架结构的主要算法。流体的流动会引起水头和空气场网格的

严重变形,所以,选择能够克服因流体穿过煤体骨架结构而引起自身网格严重畸变的 ALE 算法作为水头和空气场的运算方法,其控制流体问题的方程是 Navier-Stokes 方程的 ALE 描述<sup>[26]</sup>:

$$v \frac{\partial v_i}{\partial t} = \partial_{ij} \sigma_j + \rho b_i - \rho w_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (1)$$

式中, $w_i$  为相对速度; $v$  为流速; $i$  和  $j$  均表示坐标  $x, y$  或  $z$ ;  $t$  为时间; $\rho$  为流体的密度; $b_i$  为单位质量体力。

表 1 3 种算法的特点比较

Table 1 Comparison of the characteristics of the three algorithms

算法	描述	优点	缺点	适用范围
Lagrange 算法	以物质坐标为基础,网格依附在结构上	能够非常精确地描述结构边界的运动	物质流动时网格产生严重畸变,增大计算难度	应力-应变分析
Euler 算法	以空间坐标为基础,网格和物质结构相互独立	网格与网格之间的物质可以流动	对边界运动的定义十分困难	流体流动分析
ALE 算法	同时拥有 Lagrange 算法与 Euler 算法的特点	单元变量与速度矢量适当分配,减少网格畸变		流固耦合分析

### 2.3 材料属性

模型中材料属性的设置包括本构模型和状态方程两部分。其中,本构模型用来描述材料自身的属性,而状态方程则提供与该物质相关联的两个或更多个状态函数之间的数学关系,例如它的流速,温度,压强或内能。

在本文的模拟设置中,选择能够使自身结构不发生变形的刚体属性对煤骨架结构进行定义。水头结构则采用适合于流体属性的“MAT-NULL”本构模型。空气场作为流固耦合发生的主要场所,在属性定义时需要同时兼顾空气物理性质以及煤的多孔结构特点,而“MAT-VACUUM”是一种结合 ALE 算法的孔隙材料模型,它能够满足模拟的设置要求,因此,选其作为空气场的本构模型。通过布置线性多项式状态方程为水头处流体的运动提供压力<sup>[27]</sup>:

$$P = (C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3) + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)e_v \quad (2)$$

其中, $P$  为流体压力; $e_v$  为内能与初始体积之比; $\mu$  为比体积( $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ ,其中  $\rho_0$  为原始流体密度, $\rho$  为当前流体密度); $C_0 \sim C_6$  为系数。方程参数按照一般压力方程进行取值<sup>[28]</sup>: $C_0 = P_0 = 1.01 \times 10^5$  Pa,  $C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 0$ ,  $C_1 = 2.25$  GPa(水的体积模量)。

### 2.4 模拟方案

影响渗流效果的因素有很多,如:初始流速、压力梯度、裂隙密度、连通性、喉道尺寸等<sup>[29]</sup>,按照形成原因可以将其划分为内部因素和外部因素。初始流速和压力梯度作为外部因素一直是渗流研究中的重点。

为了研究上述两种因素对煤体微观渗流造成的影响,布置以下两种模拟方案:

(1) 对水头处的流体分别布置 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 mm/s 的初始流速值  $v_0$ , 研究不同初始流速对煤体中渗流情况的影响;

(2) 在初始流速值  $v_0$  为 0.02 mm/s 的条件下,通过状态方程设置不同的压差,研究压力梯度变化对于煤体中渗流情况的影响(注:采用的注水方式并不是持续给予水头处流体初始流速/压力)。

表 2 模型材料参数

Table 2 Model material parameters

名称	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/GPa	泊松比	黏度/ ( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )
煤	1 400	6.0	0.25	—
水头	1 000	—	—	1.0
空气场	1.2	—	—	—

## 3 模拟结果分析

### 3.1 流动过程分析

以  $v_0 = 0.02$  mm/s 的模拟为例,探究煤体中的动态渗流过程。将建立好的模型导入 LS-DYNA 中进行数值计算,得到如图 3 所示的渗流速度变化云图。由图 3 可知:在初始流速的驱动下,流体由水头快速流进入水口,并在入水口前端形成较高的动能区,而已经流入的部分,由于入水口处煤体骨架的阻碍,流速出现一定程度的降低,下降幅度在 10% 左右,在  $x$

方向上,孔隙、裂隙中流体的流程基本相同,如图3(a)所示。而当流体运动到25 s时,裂隙中流体的流程将超越孔隙中的流程,模型前端孔隙中的流速值依然较高,而孔隙部分具有较差的连通性,导致了流

体通过孔隙之间的狭小通道缓慢向模型后端区域移动,如图3(b)所示。随流动的进行,流体将首先由煤体中的裂隙结构流出,而孔隙中流体在 $x$ 方向上的推进则依然十分缓慢,如图3(c)所示。

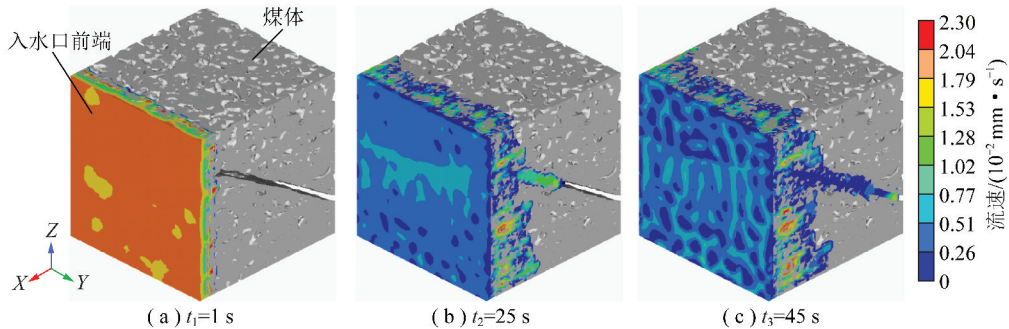


图3  $v_0 = 0.02$  mm/s 时的渗流变化情况

Fig. 3 Seepage variation at  $v_0 = 0.02$  mm/s

沿 $x$ 方向在煤体模型中间隔取面,分别提取孔隙、裂隙中的流速值,探究其中的“流速-时间”变化规律。考虑到流体在0.02 mm/s条件下的运动距离不长,选取与入水口相距0,10,20,30,40像素的位置进行截面截取,即为1号面、2号面、3号面、4号面、5号面。为了降低截面结构差异性对渗流测取造成的影响,分别对各截面孔隙中布置相同数目的测点,去除少量特殊变化的点后取平均值,制成如图4所示的曲线。由图4可知:每个截面孔隙中的流速都会经历一个“急剧上升—下降—稳定流动”的动态变化过程;上升阶段会产生一个速度峰值,在靠近入水口的1号截面中,孔隙、裂隙中流速值分别达到0.018 mm/s和0.017 mm/s,随截面

在 $x$ 方向上的推进,速度峰值的出现时间延后,其值呈现出一定程度的降低,此现象在孔隙中尤为明显;到达速度峰值后,流速明显下降,并经过一段时间的波动后趋于稳定,在此过程中,孔隙、裂隙流速变化幅度不同,裂隙的稳定流速值维持在0.004 ~ 0.008 mm/s,降低了约初始流速的60% ~ 80%,而孔隙中稳定流速值基本在0.002 mm/s左右,降低幅度约90%,这表明,在同距离内,孔隙中流体的动能损耗比裂隙的动能损耗量大。图4中流速的变化趋势与考虑毛细力作用的油水两相渗流、裂隙岩石非稳态渗流得到的流速随时间的变化规律类似<sup>[30-31]</sup>,由此可以说明本文得到的流速变化规律具有一定的合理性。

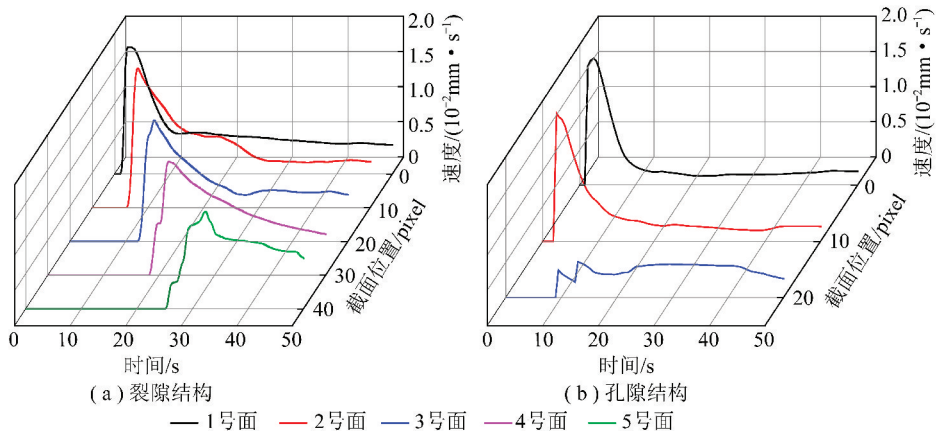


图4  $v_0 = 0.02$  mm/s 时孔隙、裂隙中不同截面上的速度变化情况

Fig. 4 Velocity variation at different sections of pores and fissures at  $v_0 = 0.02$  mm/s

### 3.2 初始流速对渗流的影响

按照作用位置的不同,初始流速对于煤体渗流的影响可划分为入水口处的影响以及煤体中的影响。图5展示了在入水口处于稳定流动阶段流体密度、流

速与初始流速之间的变化关系。由图5可知:入水口处流速与初始流速之间存在线性变化关系;而流体密度随初始流速的增加呈二次函数型增长。流体密度与流速的增长幅度不同,通过拟合公式对比发现,流

体密度的增长率呈线性增加变化,其值普遍大于  $1.13 \times 10^{-4}$ ,而流速的增长率基本维持在 0.26 左右。由于流速的增长率小于 1,流速处于低速增长阶段,这使得入水口处流体缓慢聚集,从而导致了流体密度出现了增长率较小的非线性增长。

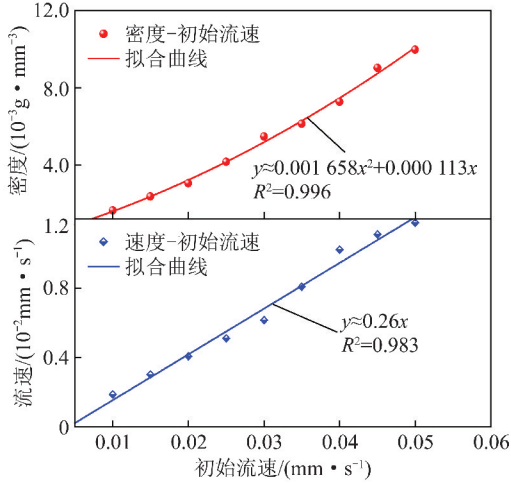


图5 入水口密度、流速与初始流速的关系

Fig. 5 Relation between the density and velocity of inlet and initial velocity

初始流速变化对于煤体中渗流情况的影响,将从流体的分布以及流速的变化两方面进行介绍。图6为25 s时不同初始流速作用下流速的分布情况,通过分析可知:在相同时间内,随初始流速的增大,裂隙中流体在  $x$  方向上的推进距离明显增加;而在孔隙结构中,不同初始流速作用下流体在  $x$  方向上的推进距离增幅不同,当  $v_0$  小于 0.03 mm/s 时,运动距离增幅明显,而当  $v_0$  处于 0.03 ~ 0.05 mm/s 范围内时,运动距离增幅则较为缓慢,流体由孔隙结构直接到达煤体后半部分区域依然存在较大的难度。对比图6中 I, II 区域的流动情况,流体可以通过裂隙周围的渗流“通道”向孔隙结构进行渗流,从而达到湿润煤体结构的作用,这种现象并不是在流体完全通过裂隙之后产生的,而是随流动逐渐进行的,并且渗流范围也随之缓慢增大,经此过程进入孔隙的流体流速值较低。由此可知孔隙中流体有两种来源渠道:一种是孔隙结构自身的渗流作用;另一种是裂隙与周围的孔隙之间的渗流作用。多数情况下,孔隙自身的渗流作用是流体进入孔隙结构的主要途径,而裂隙结构与孔隙结构之间的渗流作用只发生在裂隙周围的小部分区域,无法实现流体对煤体结构的完全侵入。

表3统计了5种初始流速下各截面孔隙、裂隙中的流速情况。可知:由于初始流速变化没有改变孔隙、裂隙中流速“急剧上升—下降—稳定”的变化趋势,使得每个测点依然存在差值较大的速度峰值与稳

定流速值;孔隙、裂隙结构连通性的差异,导致了相同截面内裂隙的速度峰值、稳定流速值普遍大于孔隙中相应的流速值;在1号面上,孔隙中速度峰值与稳定流速值具有较大的差值,使得流体进入孔隙时就损耗了大量的动能,从而减少了后续各截面孔隙中的渗流速度以及流动距离。对表3做进一步研究,在相同截面中,随初始流速的增加,孔裂隙中速度峰值基本上呈现出不同程度的增大;而稳定流速值的变化则较为复杂,在距入水口较近的1,2号面上,稳定流速值基本上随初始流速的增加而增大,而3~5号面中,稳定流速值出现了无明显规律的波动变化。初始流速的增加提高了孔隙中流体的运动距离,但流速值较低,流体继续向前运动的难度增大,这解释了图6中出现的孔隙流体向前推进缓慢的现象。对比相同初始流速下各截面中流速的变化情况,可以发现孔隙、裂隙中渗流的速度峰值以及稳定流速值具有不同的变化规律。在孔隙结构中,速度峰值随截面的推进逐渐减小,并且相邻截面之间速度峰值之差也呈现减小的趋势;而稳定流速值的变化无明显规律。在裂隙结构中,初始流速影响了各截面中速度峰值的变化规律,当  $v_0$  低于 0.03 mm/s 时,速度峰值随截面的推进呈现出“先增大后减小”的变化趋势,当  $v_0$  大于 0.03 mm/s 时,速度峰值随截面的推进逐渐减小;而在不同初始流速作用下,稳定流速值随截面的推进出现波动增大。孔裂隙结构的非均质性,是引起相同初始流速条件下流速不均匀变化的主要原因。

### 3.3 压力梯度对渗流的影响

通过方案2模拟,探究不同压力梯度对于煤体渗流的影响。图7反映的是在  $v_0 = 0.02$  mm/s 的条件下施加约 120 Pa/mm 的压力梯度后渗流的变化情况。由图7可知:压力作为渗流中动力的主要来源渠道,促进了流体的流动,尤其在孔隙中,渗流距离与未施加压力梯度的情况相比有明显的增加,局部孔隙中的流速也出现了一定程度的增大。继续采用布置截面的方法探究流速的变化规律,考虑到压力梯度的作用增加了渗流的效果,在原来截面的基础上以同等的间距增加6号、7号两个截面对流速进行测取。在求取各压力梯度下模型的平均渗流速度后,绘制了速度峰值、稳定流速值随压力梯度的变化曲线,如图8所示。压力梯度作用下速度峰值呈现出明显的非线性增大,其值与未施加压力梯度的速度峰值相比,提高了约 40% ~ 73%,但是增长速率却逐渐降低。而稳定流速值与压力梯度之间线性相关,这基本符合达西定律有关流速与压力梯度的现象描述。产生这种现象的原因是:在低压力梯度条件下,渗流速度较低,当

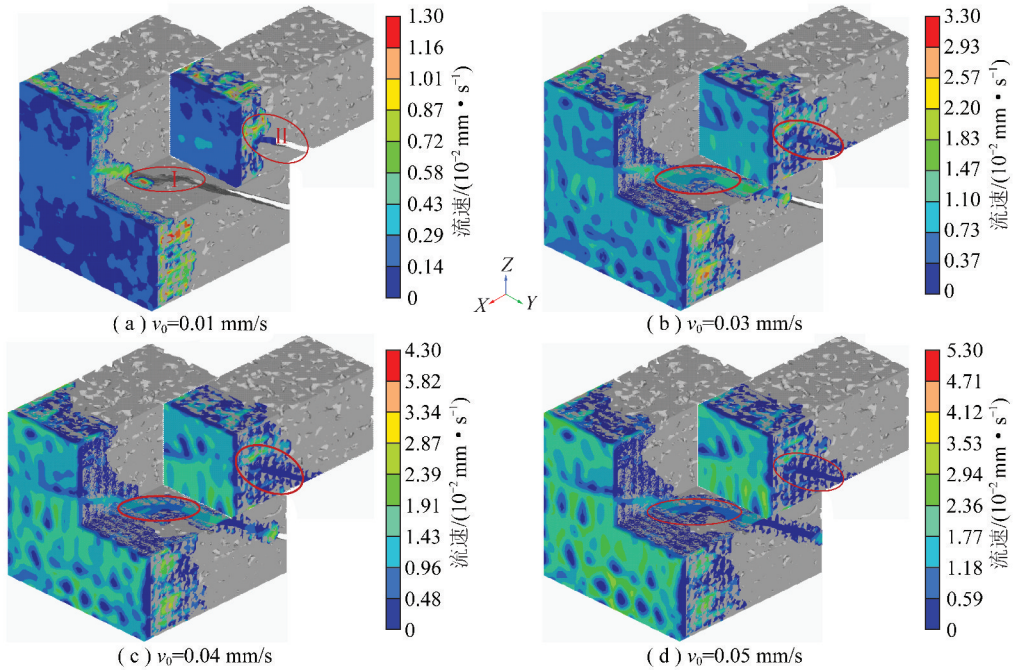


图 6 25 s 时不同初始流速下的渗流变化情况

Fig. 6 Variation of seepage under different initial velocity at 25 s

表 3 各截面速度统计

Table 3 Speed statistics of each section

截面初 始流速	1 号面		2 号面		3 号面		4 号面		5 号面		
	峰值	稳定值	峰值	稳定值	峰值	稳定值	峰值	稳定值	峰值	稳定值	
孔隙速度/ ( $10^{-2} \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	1	0.913	0.104	0.474	0.306	—	—	—	—	—	—
	2	1.807	0.196	1.019	0.348	—	—	—	—	—	—
	3	2.678	0.217	1.043	0.427	0.378	0.316	—	—	—	—
	4	3.562	0.397	1.224	0.448	0.302	0.223	—	—	—	—
	5	4.466	0.681	1.473	0.531	0.562	0.205	0.247	0.173	—	—
裂隙速度/ ( $10^{-2} \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	1	0.914	0.302	1.261	0.333	1.131	0.444	1.061	0.689	1.031	0.792
	2	1.810	0.414	2.121	0.661	1.838	0.678	1.705	0.599	1.571	0.832
	3	2.701	0.598	2.781	0.621	2.400	0.550	2.187	0.383	2.030	0.818
	4	3.603	0.729	3.477	0.768	2.900	0.810	2.645	0.525	2.424	0.774
	5	4.506	0.804	3.947	0.810	3.367	0.813	3.086	0.698	2.776	0.719

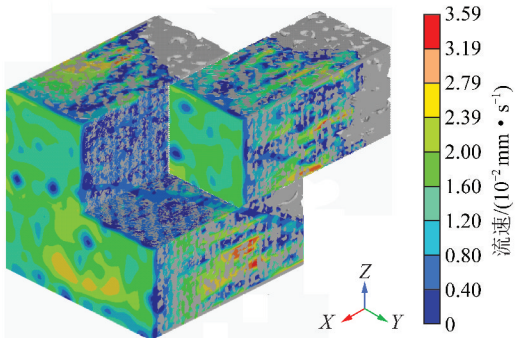


图 7 45 s 时 120 Pa/mm 压力梯度下的渗流情况

Fig. 7 Seepage at 120 Pa/mm pressure gradient in 45 s

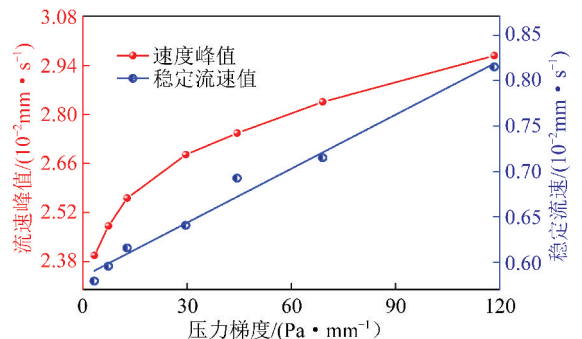


图 8 模型中流速与压力梯度的变化关系

Fig. 8 Relationship between the flow velocity and the pressure gradient in the model

雷诺数  $Re < 0.1$  时<sup>[32-33]</sup>, 渗流中黏滞力大于惯性力, 在此情况下渗流符合达西定律。通过计算, 本次渗流模拟的雷诺数  $Re$  在  $1.16 \times 10^{-4} \sim 1.63 \times 10^{-4}$ , 未超过达西渗流的要求, 因而会出现稳定流速值与压力梯度之间的线性相关关系。通过达西定律对“稳定渗流值-压力梯度”关系进行拟合:

$$v_1 = \frac{k}{\mu} \nabla P \quad (3)$$

其中,  $v_1$  为模型的稳定速度值;  $\nabla P$  为压力梯度;  $k$  为渗透率;  $\mu$  为动力黏滞系数。线性拟合得到的斜率为  $0.00198$ ,  $R^2$  为  $0.97$ 。进一步计算可得渗透率  $k = 19.8 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。

煤作为一种低渗透岩石结构, 其渗流性能很大程度上依赖于自身的孔隙微结构特征。相关研究表明<sup>[34]</sup>, 孔隙率与渗透率之间存在着一定的对应关系。结合文献<sup>[34]</sup>中建立的煤体“孔隙率-渗透率”经验公式以及本模型的孔隙率, 对模拟得到的渗透率进行验证。其经验公式为

$$k_1 = 2.92e^{\varphi(x)/12.78} \quad (4)$$

其中,  $k_1$  表示经验公式得到的渗透率。通过计算可知, 当  $\varphi(x)$  为  $26\%$ ,  $k_1$  为  $22.3 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。这与模拟得到的结果同属一个数量级, 且相差不大。因此, 可以认为模拟结果具有一定的可靠性。

## 4 结 论

(1) 基于新疆大黄山气煤 CT 图像构建出了含有孔裂隙结构的三维骨架模型。在此基础上增设水头以及空气场结构, 并结合拥有 ALE 算法的有限元软件进行渗流模拟计算。探究煤体中的动态渗流过程以及不同初始流速、压力梯度对于渗流变化规律的影响。

(2) 渗流过程中, 孔隙、裂隙中每个点的流速值都会经历一个“急剧上升—下降—稳定流动”的动态变化过程。对比速度峰值与稳定流速值可以发现, 模型前端截面中孔隙的流体动能损耗比裂隙的动能损耗量大, 这也使得流体在裂隙中的流程逐渐大于孔隙中的流程。

(3) 随初始流速的增加, 入水口处流速线性增大, 流体密度呈二次函数型递增。初始流速影响裂隙中速度峰值的变化, 当  $v_0$  小于  $0.03 \text{ mm/s}$  时, 速度峰值随截面的推进呈现出“先增大后减小”的变化趋势, 当  $v_0$  大于  $0.03 \text{ mm/s}$  时, 速度峰值随截面的推进而逐渐减小。而在孔隙中, 初始流速变化没有改变速度峰值与截面位置之间的变化关系。

(4) 压力梯度的施加促进了渗流的变化。在本

文的压力梯度条件下, 模型的速度峰值出现非线性增长; 由于雷诺数较低, 稳定流速值呈线性变化趋势, 这符合达西定律的描述。所构建的流固耦合模型不仅可以定性分析渗流规律, 还可以定量计算出渗透率, 这为渗流问题的研究提供了新的思路。作为对煤体微观低速渗流情况的初步探究, 本文考虑的影响因素较为有限, 其更大的作用在于为后续开展多相流、瓦斯吸附解吸、温度变化、毛管阻力、结构破坏等煤体渗流规律影响因素研究提供一种新的模型平台。

## 参考文献 (References):

- [1] 张晓梅, 宋维源. 煤岩双重介质注水驱气渗流的理论研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 187-190.  
ZHANG Xiaomei, SONG Weiyuan. The theoretical study on water's driving gas displacement as for double medium of coal petrography[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2): 187-190.
- [2] 宋洪庆, 朱维耀, 王一兵, 等. 煤层气低速非达西渗流解析模型及分析[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(1): 93-99.  
SONG Hongqing, ZHU Weiyao, WANG Yibing, et al. Analytical model of low-velocity non-Darcy flow of coalbed methane and its analysis[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(1): 93-99.
- [3] PANG Y, WANG G, DING Z. Mechanical model of water inrush from coal seam floor based on triaxial seepage experiments[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(4): 428-433.
- [4] 尹光志, 蒋长宝, 许江, 等. 含瓦斯煤热流固耦合渗流实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(9): 1495-1500.  
YIN Guangzhi, JIANG Changbao, XU Jiang, et al. Experimental study of thermo-fluid-solid coupling seepage of coal containing gas[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(9): 1495-1500.
- [5] 魏建平, 吴松刚, 王登科, 等. 温度和轴向变形耦合作用下受载含瓦斯煤渗流规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1): 168-174.  
WEI Jianping, WU Songgang, WANG Dengke, et al. Seepage rules of loaded coal containing gas under the coupling effect of temperature and axial deformation[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(1): 168-174.
- [6] 潘岳, 张勇, 王志强. 煤与瓦斯突出中单个煤壳解体突出的突变理论分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 595-612.  
PAN Yue, ZHANG Yong, WANG Zhiqiang. Catastrophe theoretical analysis of disintegrated outburst of a single coal shell in coal-gas outburst[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 595-612.
- [7] 田智威, 谭云亮, 刘兆霞. 含裂隙煤体瓦斯渗流规律的 LBM 数值模拟[J]. 煤炭学报, 2013, 38(8): 1376-1380.  
TIAN Zhiwei, TAN Yunliang, LIU Zhaoxia. Numerical simulation of coal gas seepage in fractured coal by LBM[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8): 1376-1380.
- [8] 秦跃平, 刘鹏, 刘伟, 等. 双重介质煤体钻孔瓦斯双渗流模型及数值解算[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1111-1117.



- QIN Yueping, LIU Peng, LIU Wei, et al. Modeling and numerical simulation of borehole methane flow in a dual-porosity, dual-permeability coal seam[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(6): 1111-1117.
- [9] GONG B, ZHANG Y, FAN Y, et al. A novel approach to model enhanced coal bed methane recovery with discrete fracture characterizations in a geochemical simulator[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 124: 198-208.
- [10] 谢东海, 冯涛, 赵延林, 等. 裂隙煤岩体的流固耦合精细模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(5): 2014-2021.
- XIE Donghai, FENG Tao, ZHAO Yanlin, et al. Fluid-solid coupling detailed model of rock-coal mass[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(5): 2014-2021.
- [11] MI L, JIANG H, LI J. The impact of diffusion type on multiscale discrete fracture model numerical simulation for shale gas [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 20: 74-81.
- [12] 叶祖洋, 姜清辉, 姚池, 等. 三维裂隙网络非稳态渗流分析的变分不等式方法[J]. 力学学报, 2013, 45(6): 878-887.
- YE Zuyang, JIANG Qinghui, YAO Chi, et al. A variational inequality approach for non-steady seepage flow through three-dimensional fracture network [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(6): 878-887.
- [13] 刘向君, 朱洪林, 梁利喜. 基于微 CT 技术的砂岩数字岩石物理实验[J]. 地球物理学报, 2014, 57(4): 1133-1140.
- LIU Xiangjun, ZHU Honglin, LIANG Lixi. Digital rock physics of sandstone based on micro-CT technology [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(4): 1133-1140.
- [14] GUNDE A C, BERA B, MITRA S K. Investigation of water and CO<sub>2</sub> (carbon dioxide) flooding using micro-CT (micro-computed tomography) images of Berea sandstone core using finite element simulations[J]. Energy, 2010, 35(12): 5209-5216.
- [15] JU Y, WANG J, GAO F, et al. Lattice-Boltzmann simulation of microscale CH<sub>4</sub> flow in porous rock subject to force-induced deformation[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(26): 3292-3303.
- [16] YAO Y, LIU D, CHE Y, et al. Non-destructive characterization of coal samples from China using microfocus X-ray computed tomography[J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 80(2): 113-123.
- [17] 宋晓夏, 唐跃刚, 李伟, 等. 基于显微 CT 的构造煤渗流孔精细表征[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.
- [18] 李玲, 汤达祯, 许浩, 等. 中煤阶煤岩控制下的煤储层孔裂隙结构特征-以柳林矿区为例[J]. 中国科技论文, 2015, 10(9): 1058-1065.
- LI Ling, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Pore and fissure structure characteristics of medium rank coal under the control of coal petrology: Taking Liulin mining area as the example[J]. China Science Paper, 2015, 10(9): 1058-1065.
- [19] 王刚, 杨鑫祥, 张孝强, 等. 基于 CT 三维重建的煤层气非达西渗流数值模拟[J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 931-940.
- WANG Gang, YANG Xinxiang, ZHANG Xiaoqiang, et al. Numerical simulation on non-Darcy seepage of CBM by means of 3D reconstruction based on computed tomography [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(4): 931-940.
- [20] NI X, MIAO J, LV R, et al. Quantitative 3D spatial characterization and flow simulation of coal macropores based on  $\mu$ CT technology [J]. Fuel, 2017, 200: 199-207.
- [21] WANG G, CHU X, YANG X. Numerical simulation of gas flow in artificial fracture coal by three-dimensional reconstruction based on computed tomography [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 34: 823-831.
- [22] 薛光武, 刘鸿福, 要惠芳, 等. 韩城地区构造煤类型与孔隙特征[J]. 煤炭学报, 2011, 36(11): 1845-1851.
- XUE Guangwu, LIU Hongfu, YAO Huifang, et al. The types of tectonic coals and pore characters in Hancheng [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(11): 1845-1851.
- [23] 谢全, 焦春艳, 崔丽萍, 等. 低渗透单相非线性渗流机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S2): 3975-3981.
- XIE Quan, JIAO Chunyan, CUI Liping, et al. Experimental investigation on single-phase non-linear flow in low permeability cores [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2): 3975-3981.
- [24] 王刚, 杨鑫祥, 张孝强, 等. 基于 DTM 阈值分割法的孔裂隙煤岩体瓦斯渗流数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 119-129.
- WANG Gang, YANG Xinxiang, ZHANG Xiaoqiang, et al. Numerical simulation of gas flow in pores and fissures of coal based on segmentation of DTM threshold [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(1): 119-129.
- [25] 孙琦, 周军, 林鹏. 基于 LS-DYNA 的弹体撞水过程流固耦合动力分析[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(6): 1498-1501.
- SUN Qi, ZHOU Jun, LIN Peng. Dynamic analysis of fluid-structure interaction for water impact of projectile using LS-DYNA [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(6): 1498-1501.
- [26] 陈福. 结构入水问题的流固耦合仿真分析[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- CHEN Fu. Fluid-solid interaction simulation analysis on water impact of structures [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.
- [27] ZHAO C, CHEN J, WANG J, et al. Seismic mitigation performance and optimization design of NPP water tank with internal ring baffles under earthquake loads [J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 318: 182-201.
- [28] 张晓波. 船底结构砰击时的流固耦合数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- ZHANG Xiaobo. Numerical simulation of fluid-structure interaction arising from bottom slamming [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [29] 张彦洪, 柴军瑞. 考虑渗流特性的岩体结构面分形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 29(S2): 3423-3429.
- ZHANG Yanhong, CHAI Junrui. Study on fractal property of fractured rock mass considering seepage characteristics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 29(S2): 3423-3429.
- [30] 刘洋, 李世海, 刘继棠. 裂隙岩体非稳态渗流数值模型及其应

- [J]. 力学与实践,2011,33(6):23-29.
- LIU Yang, LI Shihai, LIU Jitang. Numerical model of unsteady fluid flow in fractured rock and its application[J]. *Mechanics in Engineering*,2011,33(6):23-29.
- [31] 赵益忠,程远方,刘钰川,等. 启动压力梯度对低渗透油藏微观渗流及开发动态的影响[J]. *油气地质与采收率*,2013,20(1):67-69.
- ZHAO Yizhong, CHENG Yuanfang, LIU Yuchuan, et al. Study on influence of start-up pressure gradient micro-seepage in low permeability reservoirs and development trends [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*,2013,20(1):67-69.
- [32] 刘日成,李博,蒋宇静,等. 等效水力隙宽和水力梯度对岩体裂隙网络非线性渗流特性的影响[J]. *岩土力学*,2016,37(11):3165-3174.
- LIU Richeng, LI Bo, JIANG Yujing, et al. Effects of equivalent hydraulic aperture and hydraulic gradient on nonlinear seepage properties of rock mass fracture networks [J]. *Rock and Soil Mechanics*,2016,37(11):3165-3174.
- [33] THAUVIN F, MOHANTY K K. Network modeling of non-Darcy flow through porous media [J]. *Transport in Porous Media*,1998,31(1):19-37.
- [34] 刘大锰,姚艳斌,蔡益栋,等. 华北石炭—二叠系煤的孔渗特征及主控因素[J]. *现代地质*,2010,24(6):1198-1203.
- LIU Dameng, YAO Yanbin, CAI Yidong, et al. Characteristics of porosity and permeability and their geological control of permo-carboniferous coals in North China [J]. *Geoscience*,2010,24(6):1198-1203.