

## 裂隙扩张及惯性效应共同作用下裂隙中非达西渗流模拟研究

戴君一, 王礼春, 孙晓林

### Numerical investigation on the non-Darcy flow in fractures under the joint influence of fracture dilation and inertial effect

DAI Junyi, WANG Lichun, and SUN Xiaolin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202403026>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 含单裂隙非饱和带中轻非水相流体修复的数值模拟

Numerical simulation of light non-aqueous phase liquids remediation in the unsaturated zone with single fractures

赵科峰, 王锦国, 曹慧群 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 43-55

#### 预制裂隙岩样宏观力学行为颗粒流数值模拟

Particle flow simulation of macro- and meso-mechanical behavior of the prefabricated fractured rock sample

王星辰, 王志亮, 黄佑鹏, 贾帅龙 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 86-92

#### 裂隙宽度空间变异性及泄漏条件对网络裂隙中DNAPLs运移影响研究

Effects of spatial variability of fracture width and leakage conditions on the migration of DNAPLs in network fractures

常兴, 骆乾坤, 邓亚平, 马雷, 钱家忠 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 174-181

#### 水力屏障和截渗墙在海水入侵防治中的数值模拟研究

A numerical simulation study for controlling seawater intrusion by using hydraulic and physical barriers

吕盼盼, 宋健, 吴剑锋, 吴吉春 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 32-40

#### 高放废物深地质处置地下水流数值模拟方法研究进展

Advances in groundwater numerical simulation in deep geological disposal of high-level radioactive waste

李露露, 周志超, 邵景力, 崔亚莉, 赵敬波 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 13-23

#### 共和盆地干热岩体人工裂隙带结构的控热机理与产能优化

Heat control mechanism and productivity optimization of artificial fracture zone structure of dry hot rock in Gonghe Basin

陈炫沂, 姜振蛟, 徐含英, 冯波 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 191-199



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202403026

戴君一, 王礼春, 孙晓林. 裂隙扩张及惯性效应共同作用下裂隙中非达西渗流模拟研究 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(2): 44-52.

DAI Junyi, WANG Lichun, SUN Xiaolin. Numerical investigation on the non-Darcy flow in fractures under the joint influence of fracture dilation and inertial effect[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(2): 44-52.

# 裂隙扩张及惯性效应共同作用下裂隙中非达西渗流模拟研究

戴君一<sup>1</sup>, 王礼春<sup>1,2,3</sup>, 孙晓林<sup>4</sup>

(1. 天津大学地球系统科学学院表层地球系统科学研究院, 天津 300072; 2. 天津环渤海滨海地球关键带国家野外科学观测研究站, 天津 300072; 3. 天津市环渤海地球关键带科学与可持续发展重点实验室, 天津 300072; 4. 天津地热勘查开发设计院, 天津 300250)

**摘要:** 裂隙渗流是核废料、CO<sub>2</sub> 地质储存等重大工程的关键因素, 常涉及高压环境。随着水力梯度增加, 惯性效应增强, 导致非达西效应(表观渗透率减少)。然而, 前人研究常忽略高压下水力耦合作用对裂隙的扩张及相应的表观渗透率上升效应, 造成刻画和模拟渗流过程不准确。为此, 基于二维粗糙单裂隙和裂隙-基质系统, 采用直接数值模拟方法研究裂隙扩张和惯性效应 2 种机制共同作用下的非达西渗流发展规律, 探讨不同岩石基质力学性质对裂隙非达西渗流的影响。结果表明: (1) 当压力梯度较小时, 渗流处于达西流态, 2 种机制对渗流的影响都可以忽略, 随着压力梯度逐渐升高, 渗流进入非达西流态, 2 种机制都起到重要作用; (2) 在 2 种机制竞争作用下, 非达西渗流由惯性效应主导转向裂隙扩张主导, 与之对应, 裂隙等效水力开度呈现出先减小后增大的规律; (3) 基质岩石的抗变形能力越弱, 裂隙扩张主导效应越显著, 并且使得由惯性效应转向裂隙扩张作用主导的临界值也越小, 反之惯性效应主导显著。研究成果能为准确研判高压环境下裂隙介质中后达西渗流机制提供科学依据。

**关键词:** 粗糙裂隙; 非达西渗流; 裂隙扩张作用; 数值模拟; 水力开度; 临界雷诺数

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)02-0044-09

## Numerical investigation on the non-Darcy flow in fractures under the joint influence of fracture dilation and inertial effect

DAI Junyi<sup>1</sup>, WANG Lichun<sup>1,2,3</sup>, SUN Xiaolin<sup>4</sup>

(1. Institute of Surface-Earth System Science, School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Critical Zone Observatory of Bohai Coastal Region, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Earth Critical Zone Science and Sustainable Development in Bohai Rim, Tianjin 300072, China; 4. Tianjin Geothermal Exploration and Development Design Institute, Tianjin 300250, China)

**Abstract:** The fluid flow in fractures is crucial for major engineering projects such as nuclear waste disposal and

收稿日期: 2024-03-26; 修订日期: 2024-06-15

投稿网址: [www.swdzcgc.com](http://www.swdzcgc.com)

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42477063)

第一作者: 戴君一(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事裂隙后达西渗流研究。E-mail: [daijunyi@tju.edu.cn](mailto:daijunyi@tju.edu.cn)

通讯作者: 王礼春(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事渗流和溶质运移过程、地下水-地表水相互作用及其生态环境效应研究。

E-mail: [wanglichun@tju.edu.cn](mailto:wanglichun@tju.edu.cn)

CO<sub>2</sub> geological storage, which often involve with high-pressure environments. Previous studies have revealed that as hydraulic gradients increase, inertial effects become stronger, leading to non-Darcy effects (i.e., reduced equivalent permeability). Unfortunately, past studies often neglected the influence of hydromechanical coupling on modifying fracture morphology. This oversight leads to a failure in capturing the effects of pressure-induced dilation and the consequent increase in equivalent permeability, resulting in inaccuracies in characterizing fluid flow in fractures. To this end, this study, based on two-dimensional rough single fractures and fracture-matrix systems, used direct numerical simulation methods to investigate the joint effects of two mechanisms: fracture dilation and inertial effects on the development of non-Darcy flow, and explored the influence of different mechanical properties of rock matrix on non-Darcy flow in fractures. The study leads to following key findings: (1) when the pressure gradient is small, the fluid flow is in Darcy flow regime, and the effects of both mechanisms on fluid flow can be ignored. As pressure gradient gradually increases, the non-Darcy flow regime emerges, where both mechanisms play important roles. (2) Under the joint effects of above two mechanisms, non-Darcy regime can be further divided into two phases: inertial effect domination and fracture dilation domination. Correspondingly, the equivalent hydraulic aperture decreases first and then increases. (3) Moreover, the weaker the deformation resistance of the matrix rock, the more significant the dominant effect of fracture dilation, and the smaller the critical value at which the transition from inertial effect to fracture dilation occurs. Conversely, inertial effects dominate significantly. The findings of this study can provide a scientific basis for accurately assessing fluid flow in fractured media in high-pressure environments, ultimately helping better design and manage major engineering projects.

**Keywords:** rough fractures; non-Darcy flow; fracture dilation; numerical simulation; hydraulic aperture; critical Reynolds number

裂隙网络发育在天然岩体中, 由于其较高的渗透性, 通常是流体和溶质传输的优先通道。深入理解裂隙流体流动对解决各种环境、工程和地球物理问题至关重要, 例如核废料处置、地质碳封存、地下水修复、地热能开发等<sup>[1-3]</sup>。值得指出的是, 准确预测单裂隙尺度下不同流态的流体运动是解决复杂岩石裂隙网络渗流工程问题的重要基础。

裂隙中流体的渗流主要可以分为达西流态与非达西流态。当驱动压力梯度较低时, 流体运动受黏性力主导, 流量与压力梯度呈现线性关系, 此时渗流处于达西流态。当流体所受压力梯度逐渐升高时, 流速和惯性力增加, 压力梯度与流量之间的线性关系失效, 渗流状态转为非达西流态。在非达西流态中, 不断升高的压力梯度对于流体运动有着两种互相竞争的机制。一方面, 大量室内实验和数值模拟结果表明, 随着流体运动速度加快, 惯性效应会不断增强。在这个过程中, 裂隙中涡流区域不断发展和扩张, 主要流动通道空间减少, 导致裂隙渗透能力(表观渗透率)减弱<sup>[4-7]</sup>。另一方面, 在水力耦合的作用下, 不断升高的裂隙压力使岩石基质发生位移, 裂隙扩张导致裂宽增加, 从而增强裂隙的渗透能力<sup>[8-9]</sup>。在过往对

于非达西流态的研究中, 大部分研究者通常只局限于惯性效应进行裂隙渗流研究, 而常忽略裂隙扩张效应。

最新研究中, 研究者们开始逐渐认识到惯性效应和裂隙扩展作用之间是共存并不断竞争的; 并且随着压力梯度升高, 2种机制效应都变得异常显著。此时准确预测裂隙中流体运动需要对2种机制间的相互关系以及宏观流动状态的演变有充分认知。例如, Zhou等<sup>[10-11]</sup>基于室内实验以及场地试验数据, 呈现了2种作用下的宏观渗流规律(图1); 同时利用黏性渗透率与惯性渗透率之间的普遍规律, 从理论上探讨了2种机制作用大小的演变规律, 提出了一个水力梯度临界值。Xu等<sup>[12]</sup>基于三维粗糙裂隙水力耦合作用下的数值模拟, 发现水力耦合增加了裂隙开度, 减缓了流体惯性效应的增长速率, 降低了流动的非线性程度, 因此增加了渗流量。上述研究仍存在一定的局限性: 基质力学性质的影响尚未考虑<sup>[10]</sup>; 分析宏观渗流局限于有限的压力梯度范围, 未考虑流态发生完全的转变<sup>[12]</sup>。

针对上述科学难题, 本文建立了二维粗糙单裂隙-基质模型, 利用直接数值模拟方法探究了水力耦合作用下二维粗糙裂隙的变形特征和裂隙内的流体流动特征, 并进一步研究了基质岩性力学性质对于2种机

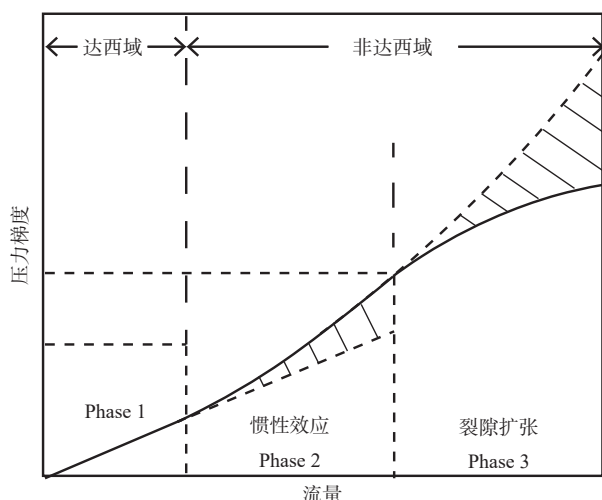


图 1 裂隙中不同流态下的宏观渗流概念图  
(修改自 Zhou 等<sup>[10]</sup>)

Fig. 1 Conceptual diagram of macroscopic seepage in fractures under different flow regimes (modified after Zhou et al<sup>[10]</sup>)

制作用下渗流的影响。本研究结果将有助于更好地模拟和预测高压环境中裂隙的渗流特性及其演变规律。

## 1 研究方法

### 1.1 裂隙渗流基本理论

#### 1.1.1 Navier-Stokes 方程

对于稳态、不可压缩的牛顿流体,其运动满足 Navier-Stokes (N-S) 方程和连续性方程:

$$\rho(\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = \mu \nabla^2 \mathbf{U} - \nabla P \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{U}$ ——流体速度场/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );

$P$ ——流体压力/Pa;

$\rho$ ——流体密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );

$\mu$ ——流体黏度/( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )。

N-S 方程尽管能够准确地描述裂隙中的渗流过程,但目前仍缺少解析解,其非线性特征使得其数值求解也十分困难。在实际工程应用中,常用一些简化控制方程求解问题,包括下面介绍的立方定律和 Forchheimer 方程。

#### 1.1.2 立方定律

当裂隙中流体压力梯度较低,处于达西流态(压力梯度与流量呈线性关系),此时流体运动可以用立方定律描述<sup>[13]</sup>:

$$Q = -\frac{e_h^3 W}{12\mu} \nabla P \quad (3)$$

式中:  $Q$ ——流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );

$e_h$ ——水力开度/m;

$W$ ——裂隙宽度/m。

立方定律是 N-S 方程的简化版本,在描述裂隙地下水渗流运动中有着广泛的运用。

#### 1.1.3 Forchheimer 方程

当裂隙中的流体压力梯度增加,惯性效应愈发显著,流体运动处于非达西流态,压力梯度增加幅度大于达西流态下流量线性成比例增加的幅度,此时常使用 Forchheimer 方程描述<sup>[14-15]</sup>:

$$-\nabla P = A Q + B Q^2 \quad (4)$$

式中:  $A$ ——线性项系数,表示黏性耗散机制引起的压力耗散/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ );

$B$ ——非线性项系数,表示惯性效应引起的压力耗散/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-8}$ )。

系数  $A$  和  $B$  主要取决于流体的性质以及粗糙裂隙的几何特征。当流体运动速度较小时,非线性项( $BQ^2$ )可以忽略不计,Forchheimer 方程则退化为立方定律。

### 1.2 基质变形基础理论

对于完整的岩石基质,当基质未出现破坏(裂隙未发生扩展)时,基质在应力作用下的变形行为可视作线弹性变形<sup>[12]</sup>。此时岩石基质的变形行为受胡克定律控制,本构关系为:

$$\mathbf{f}_v + \nabla \sigma = 0 \quad (5)$$

$$\sigma = \mathbf{C} : \varepsilon \quad (6)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}(E, \nu) \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{f}_v$ ——基质所受体积力/( $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$ );

$\sigma$ ——应力张量/( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ );

$\mathbf{C}$ ——四阶弹性张量/Pa,由岩石基质的弹性模量( $E$ )以及泊松比( $\nu$ )所决定;

$\varepsilon$ ——应变张量/m。

基于岩石基质的应变大小,即可得到更加直观的基质位移矢量场:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} [\nabla \delta + (\nabla \delta)^T] \quad (8)$$

式中:  $\delta$ ——位移矢量/m。

### 1.3 直接数值计算模型

#### 1.3.1 裂隙-基质模型

模拟单裂隙中流体运动是研究裂隙渗流规律的常用方法。然而,传统渗流模拟通常仅针对单裂隙进行研究,这限制了裂隙几何形貌的变化,无法考虑高压流体对于裂隙的扩张作用。为了探讨和分析裂隙扩



张作用下的渗流规律, 本文在常见的单裂隙模型中增加了基质部分, 对二维裂隙-基质系统进行了模拟研究。

在裂隙-基质系统中, 粗糙裂隙分布于模型中间位置, 两侧为岩石基质, 模型整体长和宽都为 5 cm。模拟中的二维粗糙裂隙形状截自于一个天然三维裂隙<sup>[16]</sup>。通过在  $y$  轴上平移上下裂隙面相对位置, 将其初始平均开度设置 ( $\langle b \rangle$ ) 为 0.1 mm, 相对粗糙度设置 ( $\sigma/\langle b \rangle$ ) 为 0.6 (其中  $\sigma$  为裂隙开度的标准差) (图 2)。

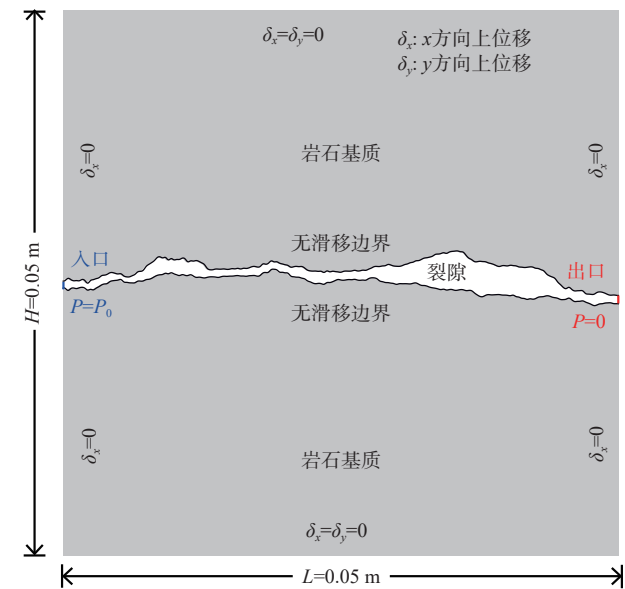


图 2 裂隙-基质系统中流固耦合概念图

Fig. 2 Conceptual diagram of fluid-structure Interaction in Fracture-Matrix Systems

注:  $H$  为模型高度;  $L$  为模型长度。

1.3.2 模型概况与边界条件

在裂隙-基质系统中, 相比于裂隙, 基质的渗透性一般非常小, 流体渗流主要发生在裂隙空间, 因此在模拟中将上下的岩石基质设置为不透水材质。二维粗糙裂隙中的流体渗流模拟通过求解稳态、不可压缩流动的 N-S 方程(式 1)和连续性方程(式 2)获得数值解。模拟中将流体设置为标准状态下的水 ( $\rho=1\,000\text{ kg/m}^3$ ,  $\mu=0.001\text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 温度为  $25\text{ }^\circ\text{C}$ )。裂隙的上下及表面均为不透水、无滑移边界。流动方向为从左至右, 左边入口为定压力边界(压力为  $P_0$ ), 右侧出口为定压力边界(压力为  $0\text{ Pa}$ )。在模拟中通过设置不同入口压力  $P_0$ , 改变驱动流体运动的压力梯度, 获取压力梯度-流量曲线。为了凸显压力梯度对于流固耦合机制的作用, 模拟中设置的入口压力范围为  $0\sim 15\text{ MPa}$ , 对应压力梯度最大可达到  $300\text{ MPa/m}$ 。

对于裂隙-基质系统, 在初始时刻, 默认为无流体流动且处于静力平衡状态; 岩石基质的上下面设置为

固定边界, 不存在  $x$ 、 $y$  方向上的位移 ( $\delta_x=\delta_y=0$ )。模型左右两侧设置为辊支承边界, 约束了边界在  $x$  方向上的位移, 因此左右两边界只存在  $y$  方向上的位移。岩石基质在流体压力作用下的几何形态变化较小且处于线弹性范围内, 其变形主要受到岩石杨氏模量和泊松比等力学属性的影响。

为了进一步研究不同岩性对于裂隙扩张作用下渗流规律的影响, 本文选取了自然界中常见的 5 种岩石: 玄武岩、花岗岩、石灰岩、砂岩、页岩, 并根据以往研究成果设置了岩石的典型力学性质参数(表 1)<sup>[17]</sup>。同时, 本文在模拟中设置了一组单裂隙模型的情况, 作为不考虑裂隙扩张作用的对照组。

表 1 基质岩性的力学性质					
Table 1 List of the mechanical properties of five typical types of rock matrix					
	页岩	砂岩	石灰岩	花岗岩	玄武岩
杨氏模量/GPa	15	35	45	60	70
泊松比	0.15	0.22	0.28	0.25	0.25

本文使用商业有限元软件 COMSOL Multiphysics 开展模拟研究。其中裂隙渗流使用 COMSOL 中的层流接口进行模拟, 基质变形部分模拟使用了变形几何和固体力学接口, 两者之间通过 COMSOL 多物理场中的流固耦合接口, 进行了双向全耦合求解。在此基础上, 采用移动网格“moving mesh”功能, 实现模拟裂隙形貌变化, 且其形貌变化精度不完全受初始网格尺寸控制。在这个过程中, 当岩石介质与裂隙中的流体接触时, 流体会对基质的边界(裂隙面)施加压力, 导致基质变形, 裂隙扩张; 反之, 变形后的裂隙又可以作为流体的移动壁边界, 并改变流场及作用于基质的压力。两者不断迭代求解, 直到小于相对误差, 获得稳定解。模拟中, 整个裂隙-基质系统空间被离散成超过  $10^6$  个拉格朗日三角形网格。为了更加精确模拟裂隙扩张行为, 近裂隙处基质使用更为精细的网格剖分, 尺寸为  $5\times 10^{-6}\sim 2\times 10^{-5}\text{ m}$ ; 基质两侧的网格稍大, 尺寸最大可达  $5\times 10^{-4}\text{ m}$ (图 3)。

为了进一步探讨模型的网格敏感性, 在岩石基质为花岗岩, 入口压力为  $5\text{ MPa}$  的条件下, 进行了不同网格疏密程度(网格数量)下的数值模拟, 计算了裂隙出口流量以及变形较显著的入口处基质位移大小。从图 3(b)可以看出, 随着网格数量增加, 出口流量以及基质位移逐渐下降, 并最终趋于稳定。采用当前网格剖分方案时, 出口流量与两倍网格数量的结果相比, 误差约为 3%; 位移与两倍网格数量下的结果误差

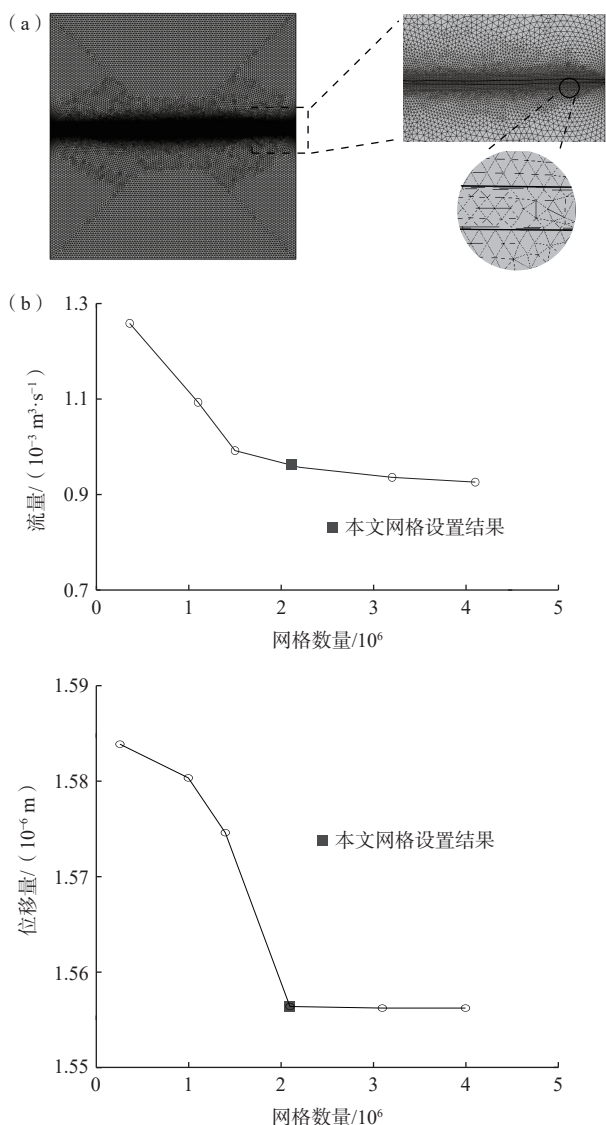


图3 模拟流量及位移对网格数量的敏感度分析

Fig. 3 Sensitivity of numerically-derived flow rate and displacement to mesh number

小于1%。随着网格划分越细,模型的结果通常会更加准确。但在实际的模拟中,两倍的网格数量会带来更大的计算时间成本。综上,本文的网格剖分兼顾了结果的准确性与模拟的效率,是一种合理的设置。

## 2 结果

### 2.1 裂隙的扩张行为

入口压力为3, 6, 9, 12 MPa时,基质岩性为砂岩的裂隙基质变形场模拟结果见图4。在水力耦合作用下,基质向两侧发生变形,导致裂隙扩张和隙宽增加,且基质变形的非对称性取决于初始裂隙形貌的弯曲度。此外,基质主要的变形集中于裂隙的入口区域,且变形量自入口向出口递减,这是由于压力自入口向

出口不断降低。同时随着入口压力不断增大,基质变形程度也在不断增加,最大变形量从 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}$ 逐渐增大到 $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}$ 。

通过上下裂隙面发生位移的累加平均,本文进一步计算了不同基质岩石性质下裂隙平均开度的变化情况(图5)。在单一岩石性质下,随着压力梯度的上升,裂隙平均开度从初始的 $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}$ 开始呈非线性上升,且斜率越来越大。

在同一压力梯度下,裂隙的平均开度随玄武岩、花岗岩、灰岩、砂岩、页岩不断递增,这是由于岩石的杨氏模量( $E$ )越小(表1),岩石的抗变形能力越弱,裂隙的扩张程度越大。

### 2.2 惯性效应与裂隙扩张作用下宏观渗流行为

随着压力梯度的增加,裂隙中的流体渗流会逐渐受到惯性效应的影响;同时从裂隙扩张行为研究可以看出,在水力耦合作用下,流体的压力能够显著增加裂隙宽度,势必影响裂隙中的流体流动行为。2种机制共同作用下的宏观裂隙渗流行为如图6所示。

总的来说,在单裂隙中,由于不考虑岩石基质的变形(即裂隙的扩张),惯性效应始终占据主导作用,流量-压力梯度关系曲线整体为向上弯曲。当考虑高压流体的裂隙扩张作用时,渗流过程中惯性效应与裂隙扩张之间产生竞争,主导裂隙渗透性能,形成了类“S”型的流量-压力梯度关系曲线。在相同的压力梯度下,从无基质(即单裂隙)到玄武岩、花岗岩、灰岩、砂岩、页岩,流量逐渐增加。

## 3 讨论

### 3.1 宏观渗流行为与岩石性质关系的探讨

在明晰了基本的宏观渗流规律后,将深入讨论基质岩性力学性质在2种机制共同作用下对渗流的影响。当流量(压力梯度)非常小时,曲线为直线,两者之间为线性关系,指示流体处于达西流态。在这一阶段(达西流态),无岩石基质案例以及不同岩石性质都表现出线性关系,而且直线基本重合。这表明在此阶段裂隙扩张可以被忽略,此时岩石性质对渗流基本无影响。随着压力梯度增加,压力-流量曲线都呈现为非线性关系,是典型的受惯性效应影响下的非达西流动状态的表现。然而,从图6中可以看出,随着压力梯度的不断增大,无岩石基质以及不同岩石基质下的曲线逐渐分离。主要表现为:到达同一流量所需要的压力梯度在无基质情况下最大,而岩石基质越容易变形( $E$ 越小),需要的压力梯度相对越低。为了更好地

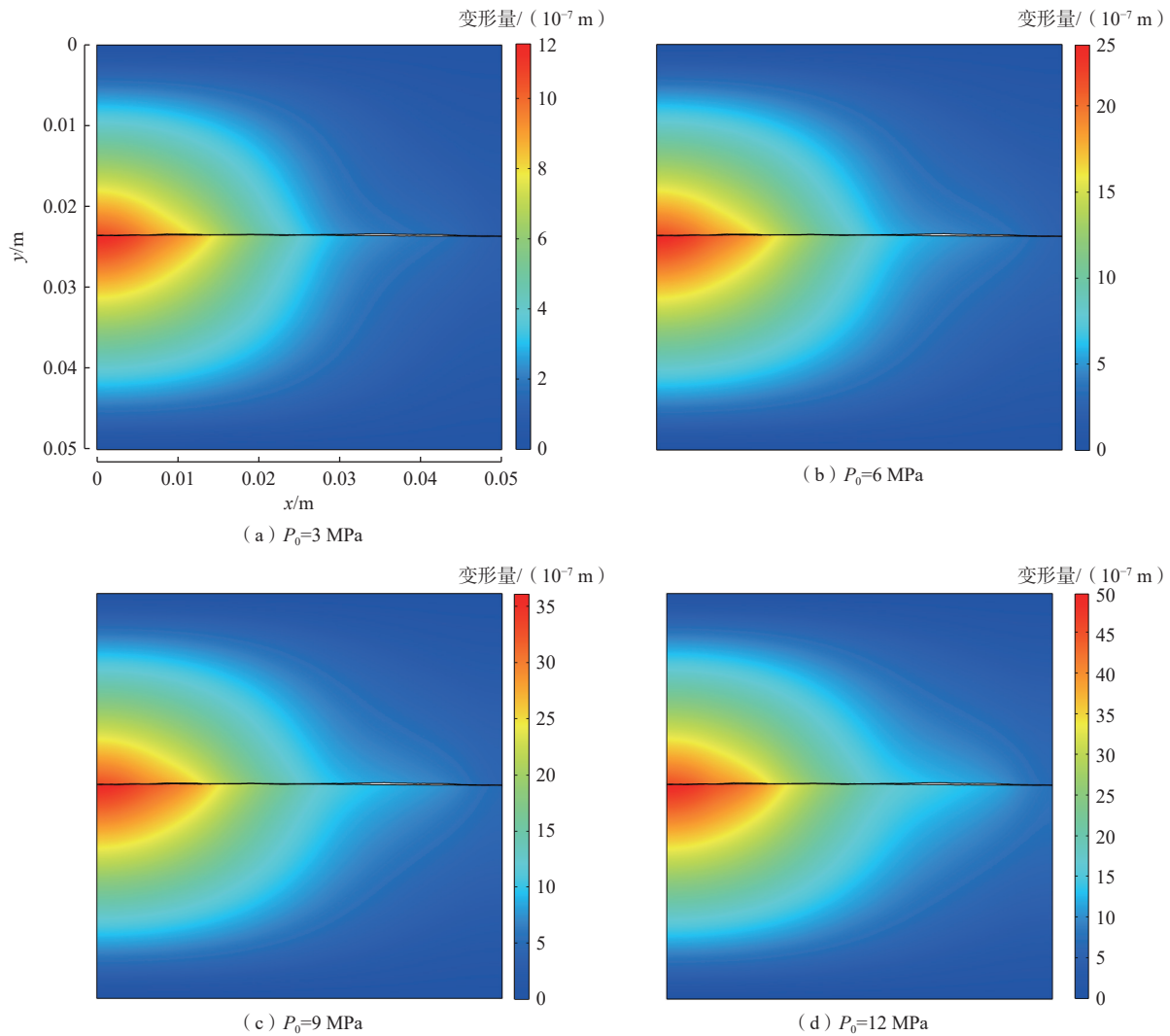


图4 不同入口压力下岩石基质变形场示意图

Fig. 4 Rock matrix deformation field under different inlet pressures

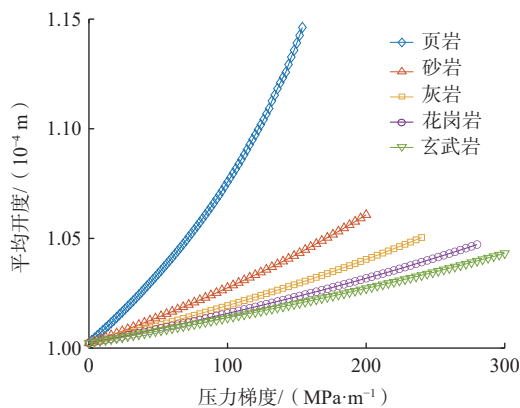


图5 裂隙平均开度变化趋势

Fig. 5 variation in average fracture aperture

定量分析, 本文引入 Forchheimer 方程对该阶段渗流进行非线性拟合。从图5可以看出, Forchheimer 方程能够很好地拟合该阶段的渗流曲线, 具体拟合参数见表2。

线性系数  $A$  之间的差异不大, 说明达西流态下裂隙扩张效应可以忽略。系数  $B$  代表着流体在裂隙中流动时的惯性效应, 数值越大代表惯性效应越显著<sup>[18-19]</sup>。从表2中可看出, 参数  $B$  随着岩石性质变硬, 逐渐变大, 在无基质情况下达到最大。上述结果表明, 基质越容易变形 ( $E$  较小), 裂隙扩张越明显, 促进了流体的渗流, 抵消了惯性效应 (即降低表观渗透率); 对于坚硬基质 ( $E$  较大), 裂隙扩张相对较小, 接近于不考虑基质下的渗流, 惯性效应更加显著。

最终, 当压力梯度增大到一定程度后, 考虑岩石基质的渗流曲线都呈现了与无基质状况下迥然不同的发展形势, 即流量-压力曲线向下弯曲。此时裂隙扩张作用开始占据主导, 渗流过程受流固耦合作用控制; 岩石力学性质对于整体渗流影响显著。随着岩石抗变形强度的减弱 ( $E$  变小), 高压流体对于裂隙的扩



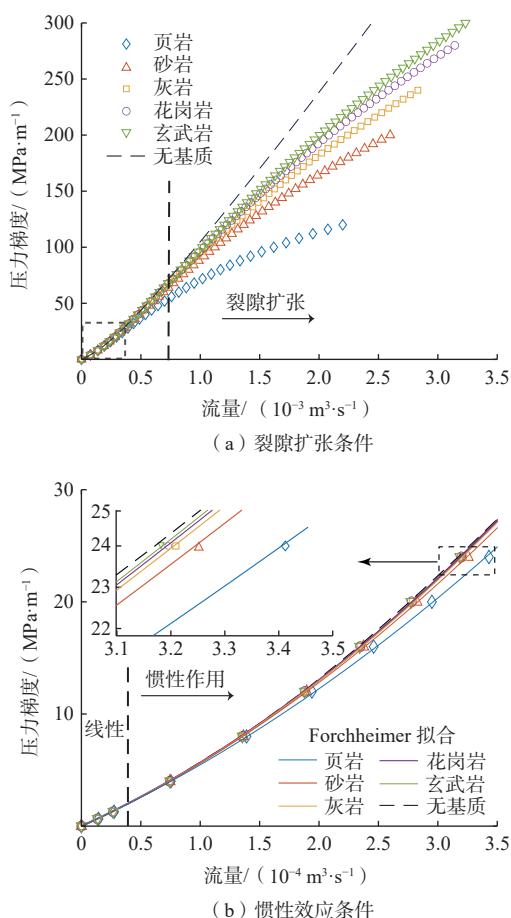


图 6 不同压力梯度条件下宏观渗流机制示意图

Fig. 6 Macroscopic seepage curves under different pressure gradient conditions

张作用愈加显著,与无基质情况下的渗流曲线偏离越大,显著提高了裂隙的渗流能力。

### 3.2 等效水力开度变化以及临界雷诺数的确定

为了进一步探讨不同渗流流态以及渗流规律的变化,计算了裂隙的等效水力开度( $e_h$ ):

$$e_h = -\left(\frac{12\mu Q}{\nabla PW}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

等效水力开度与裂隙形貌、惯性效应程度息息相关<sup>[20-21]</sup>。本研究计算获取的水力开度变化如图 7 所示。

在无基质、不考虑裂隙扩张的情况下,等效水力开度持续下降,这是由于惯性效应导致过多能量耗散所致。而在考虑基质案例中,存在裂隙扩张作用,水

力开度随流量(或压力)总体呈现为先下降,达到最小值(拐点),之后上升的变化趋势。这种转变进一步体现了渗流流态由惯性效应主导转向裂隙扩张作用主导。在不同基质岩石性质下,等效水力开度达到的最小值存在差异性。其中岩石抗变形能力越强( $E$ 越大),意味着相应的裂隙扩张作用较小,在惯性效应下能够达到的最小等效水力开度越小。

另一方面,在不同基质岩石性质下,达到最小水力开度的临界值(主导作用转变的临界值)也存在差异(图 7)。为了定量描述不同流态之间的转变,本文引入了雷诺数,并将等效水力开度达到最小值的雷诺数定义为临界雷诺数( $Re_i$ ),其中雷诺数为:

$$Re = \frac{\rho Q}{\mu W} \quad (10)$$

结果表明,岩石的杨氏模量和临界雷诺数之间呈正比关系(图 8)。岩石抗变形能力越强, $E$ 越大,裂隙的扩张作用相对越小,等效水力开度拐点对应的雷诺数越大。两者之间的经验公式为:

$$Re_i = 16.8E + 410 \quad (11)$$

利用式(11)可以快速评价高压环境下裂隙中的渗流机制,研判惯性效应占主导还是裂隙张开效应占主导,为准确预测裂隙渗流提供科学依据。

### 3.3 裂隙几何形貌对于裂隙扩张作用下宏观渗流的影响

在数值模拟中,由于裂隙的初始几何形貌固定(初始平均开度设置为 0.1 mm,相对粗糙度为 0.6),给结论带来了一定的局限性。一方面,裂隙扩张作用对于裂隙的初始开度十分敏感。从模拟结果看,当裂隙宽度处于 0.1 mm 数量级时,裂隙扩张对于裂隙平均开度的变化平均能够达到约 10%。假设裂隙的平均开度为 1 mm 数量级时,此时裂隙扩张对于平均开度的影响就只有约 1%,减小到 1/10,这也是裂隙扩张作用在之前的研究中常常被忽略的主要原因。若是将裂隙的初始平均开度进一步减小一个或多个数量级,裂隙的宏观渗流规律可能呈现出平方项系数为负数的二项式特征<sup>[18]</sup>,这种情况下裂隙扩张作用十分显著,渗流会由线性达西流态直接进入裂隙扩张作用主导

表 2 不同岩性 Forchheimer 方程拟合参数

Table 2 Summary of Forchheimer equation fitting parameters for different types of rock matrix

参数	页岩	砂岩	灰岩	花岗岩	玄武岩	无基质
$A/(10^{10} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-5} \cdot \text{s}^{-1})$	4.88	4.88	4.88	4.88	4.89	4.96
$B/(10^{13} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-8})$	6.09	7.59	7.99	8.13	8.23	8.24
$R^2$	0.99	0.99	0.99	0.98	0.96	0.98



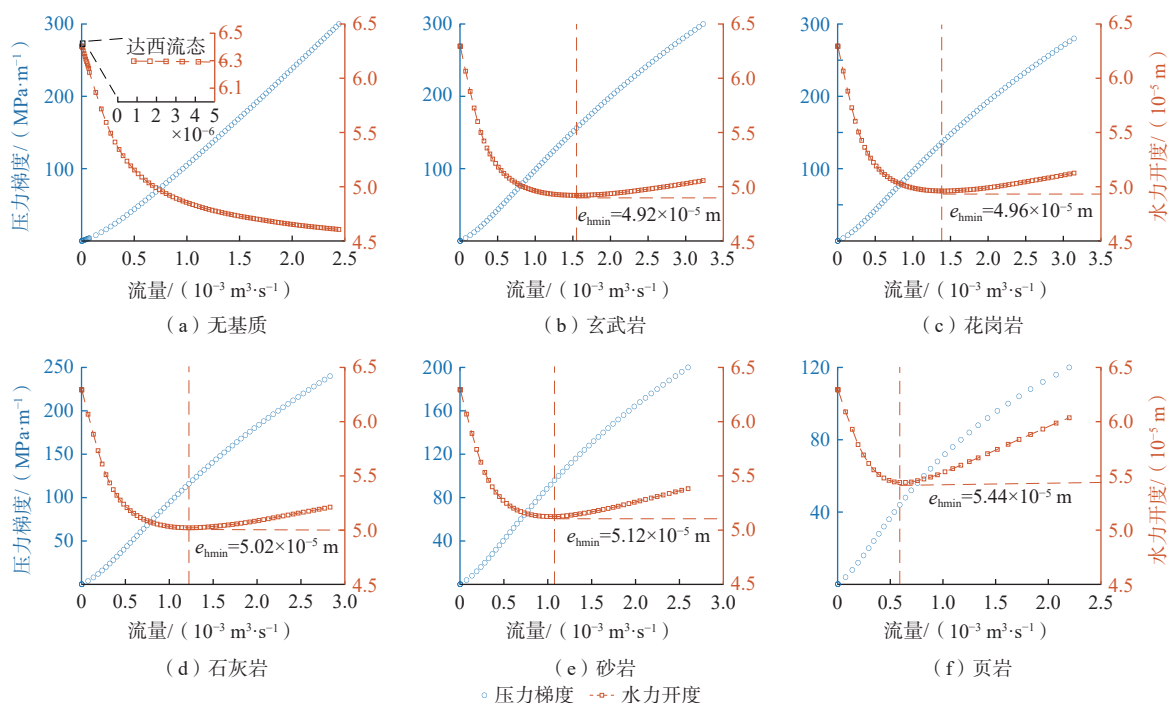


图7 不同基质岩性情况下等效水力开度变化

Fig. 7 Variations in equivalent hydraulic aperture under different matrix conditions

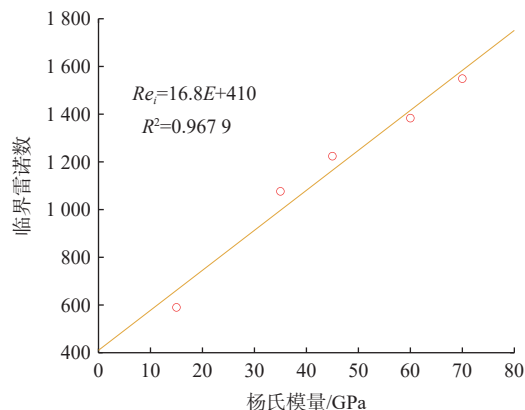


图8 杨氏模量与临界雷诺数的线性关系及其拟合曲线

Fig. 8 Linear relationship between Young's modulus and critical Reynolds number

阶段。另一方面, 裂隙的粗糙度会显著影响渗流过程中惯性效应的发展与大小。通常来说, 裂隙越粗糙, 惯性效应对渗流影响越强<sup>[6,19]</sup>。但当综合考虑裂隙扩张作用时, 裂隙粗糙度对于宏观渗流规律以及不同流态转变的影响目前仍缺乏认知。综上, 本文主要探讨了岩石基质对于考虑裂隙扩张作用影响下的宏观渗流影响。为了更好地指导实际生产实践, 需要在之后的工作中进一步综合考虑裂隙几何性质的影响。

## 4 结论

(1) 在考虑水力耦合作用时, 高压渗流过程能够

显著扩张裂隙形貌和裂隙宽度, 使得裂隙平均开度增大。平均开度的增加程度与岩石的抗变形能力(杨氏模量)呈负相关关系。

(2) 裂隙扩张作用下的宏观渗流规律呈现出3个阶段: 低流速下的线性达西流态(第一阶段); 当渗流速度逐渐上升后, 流体表现为非达西流, 根据主导作用的不同, 又可以进一步划分为由惯性效应主导(第二阶段)与裂隙扩张作用主导(第三阶段)。其中岩石抗变形能力越弱, 裂隙扩张作用越强, 与由惯性效应所主导的渗流流量-压力曲线偏离越大。

(3) 等效水力开度的变化同样表现为3个阶段: 速度较低时, 等效水力开度保持不变; 快速下降达到最小值(拐点); 最后逐渐上升。3个阶段分别对应了宏观渗流规律的3个阶段。其中从惯性主导转向裂隙扩张主导, 达到最小水力开度时对应流态变化的临界雷诺数。

(4) 临界雷诺数与杨氏模量呈正相关关系, 利用建立的经验公式可快速评估高压环境条件下的裂隙渗流机制。

## 参考文献 (References):

- [1] VISWANATHAN H S, AJO-FRANKLIN J, BIRKHOLZER J T, et al. From fluid flow to coupled processes in fractured rock: Recent advances and new

- frontiers[J]. *Reviews of Geophysics*, 2022, 60(1): e2021RG000744.
- [ 2 ] 尚慧, 柳思航, 甘智慧, 等. 浅埋煤层群开采覆岩垮落及导水裂隙带发育规律研究 [J/OL]. 水文地质工程地质, [2024-03-16]. [ SHANG Hui, LIU Sihang, GAN Zhihui, et al. Development of overlying strata collapse and water-conducting fractured zone in shallow coal seams mining[J/OL]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, [2024-03-16]. <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309025>. (in chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 焦婷婷, 邓亚平, 钱家忠, 等. 基于集合平滑数据同化与直接采样法融合水文地球物理数据刻画裂隙网络分布 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(4): 88 – 100. [ JIAO Tingting, DENG Yaping, QIAN Jiazhong, et al. Characterizing fracture networks by integrating hydrogeophysical data based on the ESMDS-DS method[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2024, 51(4): 88 – 100. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] LEE S H, LEE K K, YEO I W. Assessment of the validity of Stokes and Reynolds equations for fluid flow through a rough-walled fracture with flow imaging[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(13): 4578 – 4585.
- [ 5 ] KIM D, YEO I W. Flow visualization of transition from linear to nonlinear flow regimes in rock fractures[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(11): e2022WR032088.
- [ 6 ] ZOU Liangchao, JING Lanru, CVETKOVIC V. Roughness decomposition and nonlinear fluid flow in a single rock fracture[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 75: 102-118.
- [ 7 ] CHAUDHARY K, CARDENAS M B, DENG W, et al. The role of eddies inside pores in the transition from Darcy to Forchheimer flows[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(24): L24405.
- [ 8 ] CHEN Yifeng, HU Shaohua, HU Ran, et al. Estimating hydraulic conductivity of fractured rocks from high-pressure packer tests with an Izbash's law-based empirical model[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(4): 2096 – 2118.
- [ 9 ] VOGLER D, SETTGAST R R, ANNAVARAPU C, et al. Experiments and simulations of fully hydro-mechanically coupled response of rough fractures exposed to high-pressure fluid injection[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2018, 123(2): 1186 – 1200.
- [ 10 ] ZHOU Jiaqing, CHEN Yinfeng, TANG Huiming, et al. Disentangling the simultaneous effects of inertial losses and fracture dilation on permeability of pressurized fractured rocks[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(15): 8862 – 8871.
- [ 11 ] ZHOU Jiaqing, CHEN Yinfeng, WANG Lichun, et al. Universal relationship between viscous and inertial permeability of geologic porous media[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(3): 1441 – 1448.
- [ 12 ] XU Zengguang, ZHANG Jinsong, SHAO Lei, et al. Numerical simulation investigation on the seepage characteristics of aperture dilated rough single fracture under two-way hydro-mechanical coupling effect[J]. *Gas Science and Engineering*, 2023, 110: 204865.
- [ 13 ] WITHERSPOON P A, WANG J S Y, IWAI K, et al. Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture[J]. *Water Resources Research*, 1980, 16(6): 1016 – 1024.
- [ 14 ] RONG Guan, YANG Jie, CHENG Long, et al. A forchheimer equation-based flow model for fluid flow through rock fracture during shear[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(9): 2777 – 2790.
- [ 15 ] 朱寅斌, 李长冬, 周佳庆, 等. 粗糙岩石单裂隙非达西流动的试验和数值模拟研究 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45(6): 1278 – 1284. [ ZHU Yinbin, LI Changdong, ZHOU Jiaqing, et al. Experimental and numerical studies on non-Darcian flow in single rough-walled rock fracture[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(6): 1278 – 1284. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] WANG Lichun, CARDENAS M B, SLOTTKE D T, et al. Modification of the Local Cubic Law of fracture flow for weak inertia, tortuosity, and roughness[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(4): 2064 – 2080.
- [ 17 ] GUDMUNDSSON A. *Rock Fractures in Geological Processes*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [ 18 ] 马亚楠, 杨志兵, 熊小锋, 等. 粗糙裂隙各向异性对非达西渗流特性的影响 [J]. 人民长江, 2023, 54(1): 233 – 239. [ MA Yanan, YANG Zhibing, XIONG Xiaofeng, et al. Influence of anisotropy on non-Darcian seepage flow behavior in rough fractures[J]. *Yangtze River*, 2023, 54(1): 233 – 239. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] CHEN Yifeng, ZHOU Jiaqing, HU Shaohua, et al. Evaluation of Forchheimer equation coefficients for non-Darcy flow in deformable rough-walled fractures[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 993 – 1006.
- [ 20 ] XING Kun, QIAN Jiazhong, MA Haichun, et al. Characterizing the relationship between non-darcy effect and hydraulic aperture in rough single fractures[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(9): e2021WR030451.
- [ 21 ] XING Kun, QIAN Jiazhong, ZHAO Weidong, et al. Experimental and numerical study for the inertial dependence of non-Darcy coefficient in rough single fractures[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 127148.

编辑: 张若琳