

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.07.009

## 单裂隙中隙宽对非达西渗流的影响

梁雪琪, 钱家忠, 张昊明, 邓亚平

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 隙宽是影响岩石裂隙渗流特性的重要因素, 为探究隙宽对单裂隙中非达西渗流的影响, 文章基于 Snyfrac 软件生成的自仿射单裂隙, 采用 Comsol 软件对不同隙宽  $d$  ( $d$  为 2、3、4、5 mm) 的自仿射单裂隙进行数值模拟, 通过不同压力梯度  $\nabla P$  下流量  $Q$  的变化关系, 探讨隙宽  $d$  与临界雷诺数  $Re$ 、Forchheimer 方程黏滞项系数  $A$ 、惯性项系数  $B$  之间的关系, 并对模拟裂隙进行等比例复刻, 构造渗流试验模型, 通过相同条件下的试验验证数值模拟的可靠性。研究表明: 随着  $d$  的增加,  $Q$  和  $\nabla P$  之间的非线性越强, 非达西现象越明显, Forchheimer 方程拟合效果越好; 当  $d$  从 2 mm 增加至 5 mm 时, 临界  $Re$  逐渐减小, 裂隙中流体流态更容易转变为非达西流; Forchheimer 方程中系数  $A$ 、 $B$  均随  $d$  的减小而减小, 且与  $d$  呈幂函数关系, 黏滞项系数  $A$  对  $d$  变化更加敏感。

**关键词:** 裂隙; 隙宽; 非达西渗流; Forchheimer 方程; 数值模拟; 试验验证

**中图分类号:** P641.135

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1003-5060(2025)07-0920-06

### Effect of fracture width on non-Darcy flow in single fracture

LIANG Xueqi, QIAN Jiazhong, ZHANG Haoming, DENG Yaping

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Fracture width is an important factor affecting rock fracture flow characteristics. In order to explore the influence of fracture width on non-Darcy flow in single fracture, this paper generated the self-affine single fracture based on Snyfrac software, and conducted numerical simulation on the self-affine single fracture with different fracture widths  $d$  ( $d=2, 3, 4, 5$  mm) using Comsol software. The relationship between the fracture width  $d$  and the critical Reynolds number  $Re$ , the viscosity coefficient  $A$  and the inertia coefficient  $B$  of the Forchheimer equation was investigated by the variation of flow rate  $Q$  under different hydraulic gradients  $\nabla P$ . The simulated fracture was replicated in equal proportions to construct the flow test model, and the reliability of the numerical simulation was verified by the tests under the same conditions. The results show that with the increase of the  $d$ , the stronger the nonlinear relationship between  $Q$  and  $\nabla P$ , the more obvious the non-Darcy phenomenon, and the better the fitting effect of Forchheimer equation. When  $d$  increases from 2 mm to 5 mm,  $Re$  gradually decreases, and the fluid flow pattern in the fracture is more likely to change into non-Darcy flow. Both coefficients  $A$  and  $B$  in Forchheimer equation decrease with the decrease of  $d$ , exhibiting a power function relationship with  $d$ , and the viscosity coefficient  $A$  is more sensitive to the change of  $d$ .

**Key words:** fracture; fracture width; non-Darcy flow; Forchheimer equation; numerical simulation; test verification

**收稿日期:** 2023-04-18; **修回日期:** 2023-05-10

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41831289; 42102283); 国家自然科学基金联合基金资助项目(U2267218)

**作者简介:** 梁雪琪(1999—), 女, 河南南阳人, 合肥工业大学硕士生;

钱家忠(1968—), 男, 安徽凤阳人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: qianjiazhong@hfut.edu.cn.

## 0 引言

天然裂隙是地下水流动的主要通道,随着科技发展,人类与基岩裂隙有了更加深入的联系,如页岩气的开发、垃圾填埋、地下污染的治理等<sup>[1-2]</sup>。由此可见,探究基岩裂隙中流体流动特性是十分必要的,具有重要的实际意义。为探究基岩裂隙水的渗流特性,文献<sup>[3-4]</sup>分别从理论、试验等角度进行了研究。由于裂隙中复杂的空间分布和几何特征,精准地刻画裂隙中流体流动存在一定的难度<sup>[5]</sup>。单裂隙作为复杂网络裂隙的基本组成单元,厘清其中流体的渗流特性是全面了解裂隙网络中流体流动行为的前提条件<sup>[6]</sup>。

在单裂隙的渗流研究中,文献<sup>[7]</sup>最早在层流理论的基础上开展平行板单裂隙试验,发现裂隙断面的单宽流量与隙宽的三次方成正比,提出了立方定律,为岩石裂隙中流体渗流规律的研究奠定坚实的基础。然而,立方定律没有考虑裂隙开度的变化、粗糙度等裂隙几何因素的影响,与天然裂隙中受自然因素作用而粗糙多变的裂隙相差甚远<sup>[8]</sup>。文献<sup>[9]</sup>发现在粗糙裂隙中,随着流速的增大,流量与水力梯度之间不再符合线性立方定律,出现了非达西渗流现象。Forchheimer 方程目前被广泛应用于刻画裂隙中非达西渗流<sup>[10]</sup>。文献<sup>[11-12]</sup>通过单裂隙渗流试验发现,裂隙几何特征对非达西渗流的影响不可忽视,尤其是裂隙的隙宽;文献<sup>[13]</sup>发现裂隙渗流的非线性程度与流速和隙宽息息相关;文献<sup>[14-15]</sup>通过无压条件下单裂隙中流态变化试验,发现流体在从线性到非线性关系的转变过程中,临界雷诺数随隙宽的变化而变化。因此,隙宽对于裂隙中流体渗流有着至关重要的影响。

目前,在单裂隙非达西渗流的研究中,学者们主要围绕粗糙度和水力梯度展开分析,而隙宽的变化对流体渗流特性的影响还缺少全面系统的研究。例如,通过定量控制隙宽来探讨裂隙中流体流动特性,Forchheimer 方程参数在描述裂隙水流特性时随隙宽的变化关系等,都有待进一步的探讨。针对这些问题,本文采用 Snyfrac 软件随机生成特定分形维数  $D$  的粗糙单裂隙,对隙宽进行定量改变,并通过求解 Navier-Stokes 方程开展数值模拟,探究隙宽对粗糙单裂隙流体渗流的影响;然后通过对模拟的裂隙进行同比例复刻,开展同一裂隙、相同条件下的渗流试验,验证数值模拟的准确性和可靠性。

## 1 基本理论

流体在裂隙的渗流过程中,通常认为其为不可压缩的稳态牛顿流体,流体流动受到由牛顿第二定律导出的 Navier-Stokes (N-S) 方程控制,其方程<sup>[16]</sup>可表示为:

$$\rho \left[ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] = -\nabla P + \nabla T + \rho \mathbf{f} \quad (1)$$

其中: $\mathbf{u}$  为流速; $\rho$  为流体密度; $\nabla P$  为压力梯度; $T$  为剪应力; $t$  为时间; $\mathbf{f}$  为体积力。

对于单裂隙渗流,对流加速度项是唯一的非线性源,主要受裂隙表面粗糙度、隙宽等因素引起的空间几何形状变化的影响。

在无限长的平行板裂隙模型中,当流体低速流动时,N-S 方程可简化为立方定律<sup>[17]</sup>。当水流为一维流动时, $\nabla P$  为标量,下同。此时,裂隙中流体的压力梯度大小与流量关系可表示为:

$$-\nabla P = \frac{12\mu Q}{wb^3} \quad (2)$$

其中: $\mu$  为流体动力黏滞系数; $b$  为平行板裂隙开度; $w$  为裂隙垂直流速方向上的宽度; $Q$  为流量。

随着裂隙中流体流速的增加,惯性效应增大,流体从弱惯性效应区逐渐过渡到强惯性效应区,压力梯度大小和流量之间呈现非线性关系,流体变为非达西流,可用 Forchheimer 方程<sup>[18]</sup> 表示为:

$$-\nabla P = AQ + BQ^2 \quad (3)$$

$$A = \frac{12\mu}{w^2 e_h^3} \quad (4)$$

$$B = \frac{\beta \rho}{w^2 e_h^3} \quad (5)$$

其中: $A$  为黏滞项系数; $B$  为惯性项系数; $e_h$  为等效水力开度; $\beta$  为惯性系数。

对于裂缝中的流体流动,雷诺数  $Re$  是定义流体流动性的重要物理量。 $Re$  定义为惯性力与黏性力的比值<sup>[19]</sup>,可以通过雷诺数判定流体的流动状态,其表达式为:

$$Re = \frac{\rho Q}{\mu w} \quad (6)$$

对于  $Re$ ,当惯性力小于黏滞力时,流体为线性流;当惯性力大于黏滞力时,流体为非线性流。当流体从线性流转变为非线性流时对应的雷诺数称为临界  $Re$ 。

## 2 材料与方法

### 2.1 单裂隙水流模拟

自然界中裂隙的粗糙度总是不规则的,因此

诸多学者采用分形维数  $D$  来描述裂隙的分形结构和形状的复杂程度,从而表征裂隙表面的粗糙程度。天然裂隙中,分形维数主要集中在 1.2~1.5 范围内<sup>[20]</sup>,因此本文选择分形维数  $D$  为 1.3 来刻画裂隙的粗糙程度,具有代表性和适用性。本文使用 Synfrac 软件随机生成的分形维数  $D$  为 1.3 的自仿射裂隙,裂隙长度为 1 000 mm,如图 1 所示。保持裂隙的粗糙度不变,通过移动上、下裂隙壁面之间的相对距离,调整裂隙的平均隙宽分别为 2、3、4、5 mm,以此来控制变量,探究隙宽  $d$  对单裂隙中流体渗流的影响。

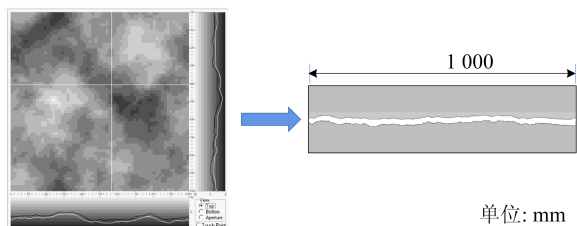


图 1 粗糙单裂隙示意图

采用 Comsol 软件与 Synfrac 软件相结合的方式,将生成的粗糙单裂隙导入到 Comsol 软件中,构建不同隙宽条件下的单裂隙数值模型。在使用软件构建裂隙模型过程中,流场采用流体流动中层流(spf)接口,各参数设置见表 1 所列。

表 1 数值模拟参数取值

参数	数值
水密度/(kg/m <sup>3</sup> )	998.20
隙宽/mm	2、3、4、5
流体动力黏度/(Pa·s)	1.0×10 <sup>-3</sup>
入口压力/Pa	1、2、3、4、5、6、7、8、9、10
出口压力/Pa	0

模型的边界条件设置为:裂隙出入口均为压力边界,压力大小分别为  $P_1$  和  $P_2$ 。通过改变入口压力  $P_1$  来改变裂隙中的压力梯度,进而模拟不同流速下裂隙中流体流动的变化。在单裂隙中,当  $Re$  为 0.01~200.00 时非达西渗流现象逐渐发育。因此,为更好刻画裂隙的非达西渗流,选取  $Re$  为 0.01~200.00 开展单裂隙渗流数值模拟,以便更好地理解隙宽对裂隙非达西渗流的影响机理。

## 2.2 单裂隙水流试验

为验证数值模拟模型的可靠性与准确性,将模

拟所用的粗糙裂隙导入 CAD 中绘制成图纸,采用激光雕刻的方法,将不同隙宽的裂隙按照 1:1 大小分别复刻在尺寸(长×宽×高)为 1 000 mm×100 mm×30 mm 的亚克力板上,得到 4 块分别刻有不同宽度凹槽的亚克力板,凹槽宽度即为裂隙所对应的隙宽,分别为 2、3、4、5 mm。以此构建物理试验模型,开展与数值模拟相同隙宽和水力梯度条件下的室内试验。

试验装置如图 2 所示,装置的主体部分主要由亚克力外壳和刻有裂隙凹槽的亚克力板组成,可以通过拆卸模型两端的法兰,更换具有不同隙宽的亚克力板内芯并分别开展相关试验。裂隙的出入水口均与水箱连接,以提供稳定的水头。可以通过调节进水箱的高度改变水头大小,从而调整模型的水力条件。模型中裂隙两端均与压力计相连接,出口与流量计相连接,便于实时监测数据。

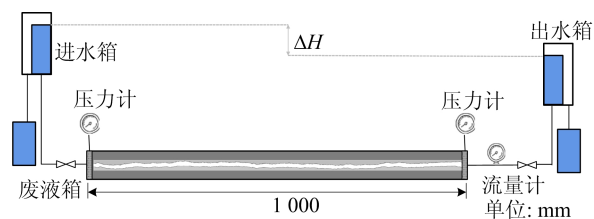


图 2 试验装置示意图

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 流体渗流模拟结果分析

不同隙宽  $d$  条件下单裂隙流量  $Q$  与压力梯度  $\nabla P$  关系如图 3 所示。

由图 3 可知,  $Q$  与  $\nabla P$  呈正相关关系。当  $\nabla P$  相同时,  $Q$  随着  $d$  的增加逐渐增大。因此在相同粗糙度下,若要实现相同流量,2 mm 裂隙需要更大的压力梯度。说明  $d$  越小,流体在流动过程中粗糙壁面对流体的能量损耗占比越大,对水流流速的影响也越大。

另外,立方定律常用于描述裂隙中压力梯度与流量之间的线性关系。当  $\nabla P$  较小时,  $\nabla P$  与  $Q$  的关系符合立方定律。然而随着  $\nabla P$  的增加,惯性力逐渐增强,  $\nabla P$  与  $Q$  之间的关系由线性逐渐转变为明显的非线性,立方定律不再适用,曲线的后半部分表现出较大的误差。这说明立方定律并不足以完整描述天然裂隙中流体的流动特性,而 Forchheimer 方程对裂隙中流体渗流的非达西现象可以进行较好刻画。

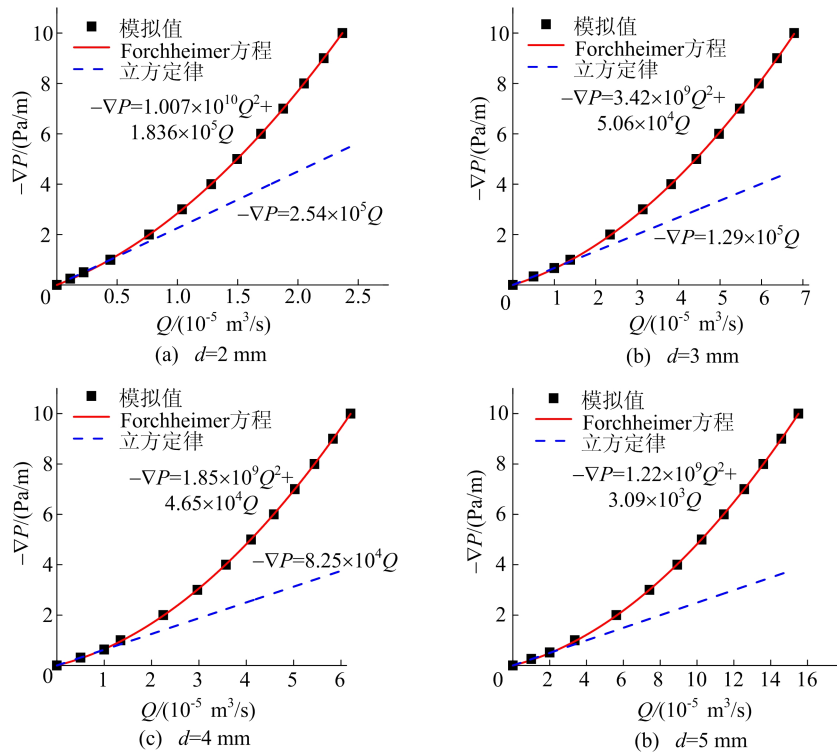


图 3 不同隙宽下压力梯度与流量关系

### 3.2 临界雷诺数与隙宽的关系

在 Forchheimer 方程中,黏滞项系数  $A$  和惯性项系数  $B$  为拟合  $\nabla P-Q$  曲线的系数,可用于定义无量纲福希海默系数  $F_0$ :

$$F_0 = \frac{BQ^2}{AQ} = \frac{BQ}{A} \quad (7)$$

$F_0$  可用于反映流体在流动过程中偏离线性渗流的程度, $F_0=0.11$  被认为是一般情况下水流从线性流态转变为非线性流态的临界值<sup>[21]</sup>。为探讨裂隙中非线性流态的转化与  $d$  的关系,本文对不同隙宽条件下的 Forchheimer 系数进行计算,计算结果如图 4 所示。由图 4 可知,随着  $Re$  增大, $F_0$  随之增大。

由式(7)可知, $F_0$  代表着惯性项和黏滞项比值的大小。当  $F_0$  小于 0.11 时,裂隙中的流体此时满足惯性力小于黏滞力,流速与水力梯度之间符合线性关系。当  $F_0$  大于 0.11 时,裂隙中流体所受的惯性力大于黏滞力,此时惯性力成为主导,流速与水力梯度之间不再符合线性关系,流体流动从线性转变为非线性。随着裂隙中流速的增大, $Re$  逐渐增大,每条裂隙  $F_0$  的最大值均大于参考的临界值,这说明随着  $\nabla P$  的增加,4 种裂隙中的水流流动状态都经历了从线性流动状态到非线性流动状态的变化。

同时,当  $d$  不同时, $F_0$  随  $Re$  变化的速率也不

相同。当  $d$  从 2 mm 增大到 5 mm 时, $F_0$  与  $Re$  之间的斜率也逐渐增大。这说明裂隙越宽,相同  $Re$  下裂隙中惯性项的变化幅度大于黏滞项,对应裂隙中流量也越大。

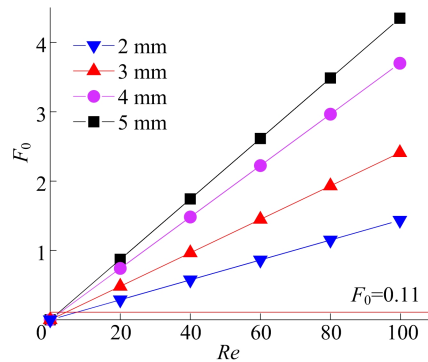


图 4 不同隙宽条件下  $F_0$  与  $Re$  的关系

当  $d$  分别为 2、3、4、5 mm 条件下,对应的临界  $Re$  的值分别为 11.83、7.92、4.47、2.63,这与文献<sup>[19]</sup>中流体流态从线性过渡到非线性对应的临界  $Re$  范围通常在 1~25 之间是相符合的。通过比较不同  $d$  条件下  $F_0=0.11$  时对应的临界  $Re$  可知, $d$  越大,临界  $Re$  越小。说明  $d$  的改变会影响水流从达西流转变为非达西流的临界条件,隙宽越大,裂隙中的流体越容易从线性流转变为非线性流。

### 3.3 Forchheimer 方程系数与隙宽的关系

在 Forchheimer 方程中,黏滞项系数  $A$  和惯性项系数  $B$  均与隙宽  $d$  有关。为探究隙宽与 Forchheimer 方程系数之间的关系,分别将系数  $A$ 、 $B$  与  $d$  进行数据拟合,拟合结果分别如图 5、图 6 所示。

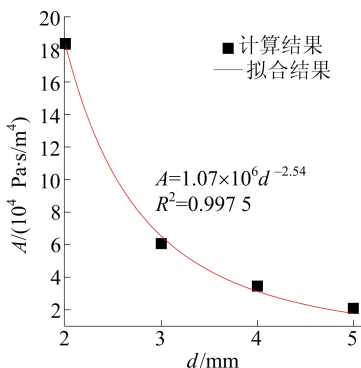


图 5 黏滞项系数  $A$  与隙宽  $d$  的关系曲线

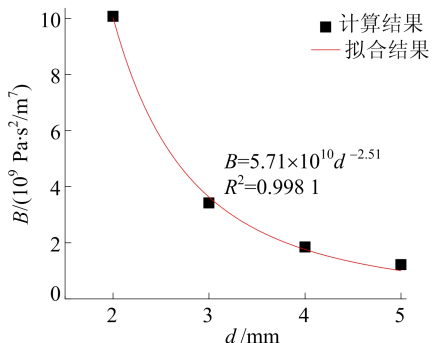


图 6 惯性项系数  $B$  与隙宽  $d$  的关系曲线

由图 5、图 6 可知,随着  $d$  增加,系数  $A$ 、 $B$  均逐渐减小,且呈现出幂函数关系,相关系数  $R^2 > 0.99$ ,其关系式为:

$$A = 1.07 \times 10^6 d^{-2.54} \quad (8)$$

$$B = 5.71 \times 10^{10} d^{-2.51} \quad (9)$$

式(8)和式(9)均为经验公式。

系数  $A$ 、 $B$  均与  $d$  呈幂律关系,这与文献[10]和文献[22]中  $d$  与系数  $A$ 、 $B$  之间存在幂函数关系的研究结果吻合。此外,由式(4)和式(5)可知,  $d$  是影响黏滞项系数  $A$  的唯一因素,而惯性项系数  $B$  除了受  $d$  的影响外,还与裂隙的表面粗糙度、空间分布等诸多因素有关,因此,对于式(7)的适用范围有一定的局限性,更适用于本文所研究的数值模型。

从图 5、图 6 可以看出,系数  $A$  和  $B$  随着  $d$  的增加逐渐减小。其中,当  $d$  从 2 mm 增大到 3 mm 时,系数  $A$ 、 $B$  减小的幅度最大,是  $d$  从 4 mm 增

大到 5 mm 时参数变化幅度的数倍。这说明系数  $A$ 、 $B$  对  $d$  的敏感性随着  $d$  的增加而逐渐降低。

从拟合结果可以看出,  $B$  的数值比  $A$  的数值大 4 个数量级。当  $d$  为 2~5 mm 时,惯性项系数  $B$  从  $1.01 \times 10^{10}$  减小到  $1.22 \times 10^9$ ,其变化范围在 1 个数量级内,  $A$  则从  $1.84 \times 10^5$  减小到  $3.09 \times 10^3$ ,其变化范围达到 2 个数量级。结果说明,当  $d$  相同时,黏滞项系数  $A$  的变化幅度更大,系数  $A$  对隙宽  $d$  的变化更加敏感。

### 3.4 试验对比验证

为验证模拟结果的可靠性,本文对模拟裂隙进行复刻,构建物理试验模型,在相同隙宽和水力梯度条件下开展室内试验。将所得数据与模拟数据进行对比分析,结果如图 7 所示。

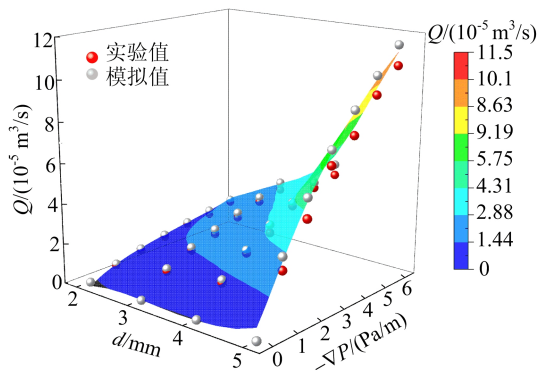


图 7 室内试验与数值模拟流量数据对比

由图 7 可知,随着隙宽  $d$  和压力梯度  $\nabla P$  的增加,试验测值和模拟值均增加,且模拟数据总是略大于试验数据,两者之间存在 2%~10% 误差。其误差可能是由于试验模型裂隙表面的粗糙导致试验过程中存在水流与裂隙表面的摩擦所造成的水头损失,从而使流量小于模拟值。其次是在本文中的数值模拟采用的是二维模型,这与实验室内的三维模型试验存在一定的误差。总体来看,数值模拟基本上能够准确刻画流体流动过程中的变化特征,再现室内试验的结果。

## 4 结 论

通过开展不同隙宽  $d$  条件下的单裂隙数值模拟,本文研究了隙宽对渗流的影响,并通过室内试验验证数值模拟的可靠性,得出以下结论:

- 1) 粗糙单裂隙中水流流动受隙宽影响。相同水力梯度条件下,隙宽越大,粗糙裂隙中单位时间内流量越大,  $Re$  越大,非达西渗流现象越明显。

2) 粗糙单裂隙中,隙宽从 2 mm 增加至 5 mm 时,临界  $Re$  逐渐减小,水流流态越容易从达西流转变为非达西流。

3) Forchheimer 方程系数  $A$ 、 $B$  均随隙宽的增加而减小,且与隙宽之间呈良好的幂函数关系。当隙宽  $d$  在 2~5 mm 范围内时,黏滞项系数  $A$  对隙宽的变化更加敏感。

4) 试验和模拟结果表明,数值模拟总体上能够较好地再现裂隙中流体的渗流过程。在相同隙宽和压力梯度条件下,模拟数据总是比试验数据略大 2%~10%。

### [参 考 文 献]

- [1] TSANG C F, NERETNIEKS I, TSANG Y. Hydrologic issues associated with nuclear waste repositories[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(9):6923-6972.
- [2] CHEN Z, QIAN J Z, ZHAN H B, et al. Effect of roughness on water flow through a synthetic single rough fracture[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(4):1-17.
- [3] CHERUBINI C, GIASI C I, PASTORE N. Evidence of non-Darcy flow and non-Fickian transport in fractured media at laboratory scale[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(7):2599-2611.
- [4] EBRAHIMI A N, WITTEL F K, NAM A, et al. Multi-scale approach to invasion percolation of rock fracture networks [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519:353-363.
- [5] 孙明贵, 黄先伍, 李天珍, 等. 石灰岩应力应变全过程的非 Darcy 流渗透特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(3):484-491.
- [6] BERKOWITZ B. Characterizing flow and transport in fractured geological media: a review[J]. *Advances in Water Resources*, 2002, 25(8/9/10/11/12):861-884.
- [7] LOMIZE G M. *Flow in fractured rocks*[J]. Gosenergoizdat Moscow, 1951, 127(197):635.
- [8] BOSCHAN A, IPPOLITO I, CHERTCOFF R, et al. Characterization of fracture aperture field heterogeneity by electrical resistance measurement[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2011, 123(1/2):65-74.
- [9] QIAN J Z, ZHAN H B, LUO S H, et al. Experimental evidence of scale-dependent hydraulic conductivity for fully developed turbulent flow in a single fracture[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 339(3/4):206-215.
- [10] CHEN Y F, ZHOU J Q, HU S H, et al. Evaluation of Forchheimer equation coefficients for non-Darcy flow in deformable rough-walled fractures[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529:993-1006.
- [11] RONG G, TAN J, ZHAN H, et al. Quantitative evaluation of fracture geometry influence on nonlinear flow in a single rock fracture[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 589(1/2):125-162.
- [12] 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.
- [13] ZHANG Z, NEMCIK J. Fluid flow regimes and nonlinear flow characteristics in deformable rock fractures[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 477(1):139-151.
- [14] QIAN J Z, WANG M, ZHANG Y, et al. Experimental study of the transition from non-Darcian to Darcy behavior for flow through a single fracture[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2015, 27(5):679-688.
- [15] 钱家忠, 王沐, 严小三. 单裂隙承压无压条件下达西非达西流演变试验研究[J]. *皖西学院学报*, 2014, 30(5):109-115.
- [16] ZOU L C, JING L, 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.
- [17] ZHAO Z H, JING L, NERETNIEKS I. Evaluation of hydrodynamic dispersion parameters in fractured rocks[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2010, 2(3):243-254.
- [18] ZHOU J Q, CHEN Y F, WANG L C, et al. Universal relationship between viscous and inertial permeability of geologic porous media [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(3):1441-1448.
- [19] ZIMMERMAN R W, AL-YAARUBI A, PAIN C C, et al. Non-linear regimes of fluid flow in rock fractures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(3):163-169.
- [20] JU Y, ZHANG Q G, YANG Y M, et al. An experimental investigation on the mechanism of fluid flow through single rough fracture of rock[J]. *Science China*, 2013, 56(8):2070-2080.
- [21] ZENG Z W, GRIGG R. A criterion for non-Darcy flow in porous media [J]. *Transport in Porous Media*, 2006, 63(1):57-69.
- [22] 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.

(责任编辑 吴 亮)