

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0250

基于圆盘裂隙物理模型的岩体单一 裂隙渗流规律试验研究

王明玉¹, 刘庆哲¹, 曲辞晓¹, 李金柱²

(1. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 101408; 2. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 岩体中裂隙平行板渗流模型被广泛地应用于实际岩体裂隙渗流过程与特征的定量描述与刻画, 但实际岩体裂隙渗流的空间域与平行板假设可能相差甚远。因此, 裂隙平行板渗流模型应用于实际裂隙渗流条件下的模型有效性及适宜的修正表达方法成为关注点。选取更接近实际裂隙空间分布的圆盘形状, 在室内构建单圆盘裂隙物理模型。通过改变圆盘裂隙的隙宽和裂隙相交产生的水流进出口交线长度, 进行不同压力梯度下的渗流试验, 探讨不同岩体隙宽和交线长度下的裂隙水渗流规律。试验结果表明, 针对不同雷诺数下的非达西流态, 达西定律模型在一定程度仍能较好地刻画岩体裂隙渗流量和压力梯度的统计关系, 但 Forchheimer 模型精准度更高。值得注意的是, Forchheimer 模型中参数 A 与 B 的计算式需要修正。提出了修正方法, 并依据试验数据获得了具有一定应用范围的 A 与 B 相应修正计算式。研究成果可望为岩体中单一裂隙及复杂裂隙网络渗流研究与工程应用提供一定理论基础与方法借鉴。

关 键 词: 岩体裂隙渗流; 圆盘裂隙模型; 渗流试验; 渗流规律; 模型修正

中图分类号: P 641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 11-3523-08

Experimental investigation on the seepage flow through a single fracture in rocks based on the disc fracture model

WANG Ming-yu¹, LIU Qing-zhe¹, QU Ci-xiao¹, LI Jin-zhu²

(1. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;

2. College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: The fracture parallel plate seepage model has been widely applied to describe the processes and characteristics of fluid flow through fractures in rocks, while the actual flow field of the fracture seepage in rocks could be far more complicated than the assumption of rock matrix to be parallel plates. As a result, it draws lots of attentions on investigations on suitability and corrections of the fracture parallel plate seepage model. In this study, by taking the disc fracture model which is closer to the actual fracture shape than the parallel plate model, a physical model of a single disc fracture was constructed in the laboratory. By changing the aperture of the disc fracture in rocks and the sizes of the water inlets and outlets, the seepage experiments under different pressure gradients were conducted to investigate the laws of fluid flow in fractures. The experiment results show that the Forchheimer model fitted the relationship between the seepage flow and pressure gradient inside the disc fracture relatively well while the Darcy law model presents also a good fitting for the Non-Darcy flow regimes. It should be noticed that the calculation formulas of the parameters A and B in the Forchheimer model need to be modified as to the Forchheimer model. Furthermore, an approach has been recommended for those modifications and the corresponding modified calculation formulas with certain reliability have been given based on the experimental results. This study is expected to provide in certain degree theoretical foundations and methods for further investigation of fluid flow through a single fracture in rocks and the complex fracture networks.

Keywords: seepage through fractures in rocks; disc fracture model; seepage flow experiment; seepage flow law; model modifications

1 引 言

研究流体在地下岩体裂隙中的运动, 实质是研

究流体在整个裂隙网络中流动, 其中渗流特性对指导工程设计有着重要意义。裂隙网络是由单个裂隙和网络节点所构成, 单个裂隙的渗透性质不仅与三

收稿日期: 2020-01-09

修回日期: 2020-04-13

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 41572240); 国家重点研发计划 (No. 2019YFC1806205)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41572240) and the National Key Research and Development Program (2019YFC1806205).

第一作者简介: 王明玉, 男, 1961 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事裂隙水动力学及地下水环境方面的研究。E-mail: mwang@ucas.edu.cn

维裂隙网络的发育、位置特征有关,且与自身隙宽、形态和产状密切相联。所以,为了更好地研究复杂岩体裂隙网络渗流问题,开展单个裂隙的渗流试验研究是前提条件。1856 年,法国工程师 Darcy 提出渗透速度与水力梯度成线性关系,这也成为了地下水运动的最基本规律^[1],其被广泛运用到各种数值模型假设中,开发了大量的地下水流数值模拟工具。但地下裂隙的粗糙度^[2]以及水流高渗透流速状态,流动路径方向的改变或流速持续增加引起的局部湍流都会导致不可忽略的惯性损失,因此,达西定律在这种情况下不适用。目前 Bear^[3]、Qian^[4]、张烨^[5]、刘日成^[6]、严小三^[7]等在这方面进行了研究,发现渗透速度和水力梯度满足二次多项式关系 (Forchheimer 公式),并且进一步用非达西影响系数 β ^[8] 来表示,在二者拟合临界处, Zeng 等^[9]用 Forchheimer 数来表示达西与非达西效应的边界标准;另外, Chen^[10]、李文亮^[11]等用幂函数 (Izbash 方程) 来表达二者之间的关系,但没有二次多项式应用广泛。

在目前所使用的模型材料方面,有光滑有机玻璃平行板模型,大理石平板裂隙,3D 打印技术,沟槽流模型^[12]等,但都是基于平行板模型,裂隙宽度均相等,而实际裂隙形态不规则,裂隙间相交交线长度也不同,所以裂隙宽度均相等这种假设与实际情况相差较大。在岩溶裂隙研究中,应用最广泛的是圆盘裂隙网络模型,将形态不规则裂隙概化为圆形,且有证据表明裂隙在走向和倾向方向上空间长度近似相等^[13-15]。

为了探求单裂隙中的渗流特征,笔者基于前人在单裂隙形态概化成等宽平行板的成果上,根据圆盘模型假设将裂隙形状概化为圆盘,构建单圆盘裂隙物理模型,开展不同裂隙几何参数、不同水力条件下的渗流试验,进一步分析得到相应渗流规律,为三维裂隙网络的数值模拟提供参考与修正依据。

2 研究方法

2.1 单圆盘裂隙物理模型的建立

部分岩石本身不透水,地下水只能通过其中的裂隙流动。鉴于上述情况,本次试验仅考虑岩体中裂隙透水,并根据天然裂隙实际形态趋于圆形或椭圆形,将其概化为圆盘形状,这样比等宽度平行板模型在形态上更趋于自然裂隙,水流在其中的运动也能更接近于实际。圆盘与平行板的区别是各地方裂隙宽度不完全一致,本文是为了模拟野外裂隙间相交交线长度明显小于裂隙最大宽度的情况。当交线长度非常大时,可近似为平行板模型。单圆盘

裂隙物理模型概化图见图 1。周志芳^[16]对裂隙张开度进行了分类,其中以中等宽度的裂开裂隙(隙宽为 1~5 mm)较为常见。本次试验装置是采用厚度为 2 cm 的有机玻璃制作,用来模拟中等宽度的裂开裂隙渗流性质,隙宽可调节。共完成两套试验,第 1 套为主试验,试验中圆盘直径为 50 cm,隙宽设置为 2.3、3.1、3.8 mm,分别设置进出处交线长度为 2、4、6、8、10 cm,进而可以模拟裂隙中不同交线长度的水流运动情况。第 2 套为验证试验,试验中圆盘直径为 40 cm,隙宽设置为 3.0 mm,分别设置进出处交线长度为 4、6、8 cm。两套试验皆在下圆盘底板边缘处固定同一厚度的垫片,上圆盘顶板嵌入,两圆盘边缘处采用玻璃胶进行密封,保证密闭性。每个垫片都用游标卡尺进行精确测量,另外有机玻璃厚度为 2 cm,不易变形,保证了圆盘内部隙宽保持一致,进出交线长度可变。需要说明的是,为了与传统的等宽度平行板进行比对,试验中进口与出口长度保持相同,仅比较中间渗流区域形态上的差异。整个试验系统由供水系统、缓冲槽、单圆盘裂隙物理模型和秒表组成。第 1 套试验圆盘物理模型参数见表 1,试验系统见图 2,图 3 为单圆盘裂隙物理模型实物图。

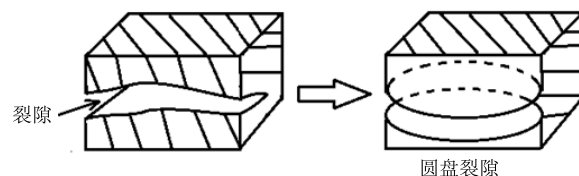


图 1 单圆盘裂隙物理模型的概化

Fig.1 Schematic diagram of a single disc fracture physical model

表 1 第 1 套试验单圆盘物理模型参数取值表
Table 1 Single disk physical model parameter values

隙宽 e / mm	圆盘 直径 / cm	交线 长度 L / cm	进口 数量 / 个	出口 数量 / 个	装置长 / cm	装置宽 / cm	装置高 / cm
2.3, 3.1, 3.8	50	2, 4, 6, 8, 10	1	1	80	52	15

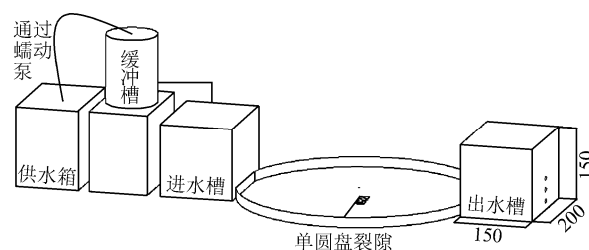


图 2 试验系统示意图 (单位: mm)

Fig.2 Schematic diagram of the experimental system (unit: mm)



图 3 单圆盘裂隙物理模型实物图

Fig.3 Image of the single disk fracture physical model

2.2 试验方法

本次第 1 套试验共进行 105 组渗流试验，在试验开始之前调节装置水平放置，将导管、进水箱、裂隙内部、出水箱都注满自来水，排出空气，使整个系统内部饱水，满足饱和流条件。使用蠕动泵将水从供水箱中泵入缓冲槽中，再从缓冲槽调节开关进入进水箱中，调节裂隙交线长度和隙宽，待进出水箱中水位稳定并记录，在出口处测流量 3 次，取平均值；每 1 组裂隙参数皆考虑 7 个压力梯度。依次调节裂隙参数和泵的转速，重复以上试验。交线长度为水箱与裂隙连接处的长度。裂隙参数组数及相应压力梯度变化情况如表 2 所示。

表 2 第 1 套试验裂隙参数组数与压力梯度组数表

Table 2 Number of fracture parameter groups and applied pressure gradients for first experimental set

e/mm	L/cm	组数
2.3	2	7
2.3	4	7
2.3	6	7
2.3	8	7
2.3	10	7
3.1	2	7
3.1	4	7
3.1	6	7
3.1	8	7
3.1	10	7
3.8	2	7
3.8	4	7
3.8	6	7
3.8	8	7
3.8	10	7

2.3 平行板裂隙模型渗流方程

2.3.1 立方定律

当裂隙岩体内部流体流速较小时，通过单个岩石裂隙最简单的流体模型是平行板模型，它将裂隙概化为两个由狭窄间隙隔开的平滑平行板，在线性达西流动区，可以使用下式所示的立方定律来计算裂隙内部的流体流动。即

$$Q = -\frac{w_0 e^3}{12\mu} \nabla P \quad (1)$$

式中： Q 为渗透流量 (m^3/s)； w_0 为裂隙宽度 (cm)；

e 为隙宽 (mm)； μ 为动力黏滞系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)； ∇P 为压力梯度 (Pa/m)。

2.3.2 Forchheimer 定律

对于平行板裂隙模型，当裂隙内部的流速较小时，往往可以使用立方或达西定律来计算。但随着流速的增大，渗流量与压力梯度不再呈线性相关，立方或达西定律不再适用。Bear^[3]、Chen 等^[10]提出使用下面所示的 Forchheimer 定律来表示这种非线性关系。即

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

$$A = \frac{12\mu}{w_0 e^3}, B = \frac{\rho\beta}{w_0^2 e^2} \quad (3)$$

式中： A 为线性系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^4$)； B 为非线性系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}^2/\text{m}^7$)； ρ 为密度 (kg/m^3)； β 为非达西系数 (m^{-1})。本文采用 A 、 B 来表征 Forchheimer 公式的参数变化。

3 圆盘裂隙内部渗流特性分析

3.1 裂隙内的雷诺数范围

为了研究有机玻璃圆盘内部水流流动特征，如上所述，本研究分别进行了隙宽为 2.3、3.1、3.8 mm 的渗流试验，每种隙宽下分为 5 种交线长度情况：2、4、6、8、10 cm，每一种交线长度条件下进行 7 组不同的压力梯度渗流试验，并测定每组压力梯度下的流量，共 105 组。通常，人们会先根据流体的流态^[17-18]来选择试验的渗流计算公式，而雷诺数是表示流态的重要参数，其为流体惯性力与黏滞力之比，全面反映了流体密度和黏滞系数的性质。所以下面首先通过计算雷诺数来确定所有试验条件下的流体流态。雷诺数 Re 计算公式如下：

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (4)$$

式中： d 为特征长度 (cm)；当在非圆形管道中， d 为当量直径，等于 4 倍面积除以周长，即

$$d = 4 \frac{e w_0}{2(e + w_0)} \quad (5)$$

则雷诺数计算表达式为

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{\rho v}{\mu} \cdot 4 \frac{e w_0}{2(e + w_0)} = \frac{2 \rho v e w_0}{e + w_0} \quad (6)$$

与等宽度平行板不同，圆盘裂隙中沿流向不同过水断面宽度不等，渗透路径长短不一，导致各渗透路径平均水力梯度也不相等。为方便计算，需要确定等效裂隙宽度与等效渗透路径长度。对于圆盘裂隙模型，等效裂隙宽度 w 可用 $(2R - L)/\ln(2R/L)$ ^[14] 来估算，其中 R 为裂隙半径。考虑到进、出口两交

线垂线距离为最短渗透路径, 而靠近圆弧处渗透路径最长, 本文选择其中间一路径来估算等效渗透路径长度, 如图 4 所示。

从表 3 可以看出, 所有试验条件下的雷诺数范围在 307~1 594 之间, 从圆盘内水流平均流速看属于层流^[19]。

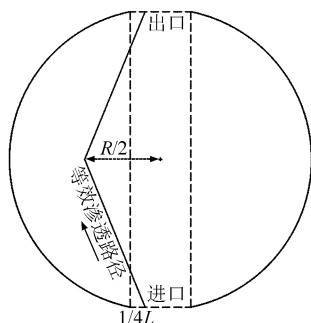


图 4 典型等效路径方法

Fig.4 A typical equivalent path method

表 3 不同试验条件下的雷诺数值

Table 3 Reynolds numbers under various experimental conditions

L/cm	e=2.3 mm		e=3.1 mm		e=3.8 mm	
	∇P /(Pa·m ⁻¹)	雷诺数	∇P /(Pa·m ⁻¹)	雷诺数	∇P /(Pa·m ⁻¹)	雷诺数
2	177	307	283	416	247	403
2	318	399	406	495	389	514
2	459	485	459	536	565	612
2	583	540	654	625	813	705
2	742	616	919	735	901	763
2	848	686	1 131	854	1 096	835
2	1 043	786	1 661	1 055	1 484	1 020
4	125	327	267	615	89	427
4	249	454	445	801	178	581
4	427	628	730	1 036	356	799
4	623	810	926	1 218	552	986
4	837	925	1 033	1 313	712	1 094
4	1 068	1 126	1 282	1 490	855	1 236
4	1 300	1 260	1 496	1 594	1 068	1 490
6	161	413	197	584	108	538
6	287	572	341	801	197	722
6	413	705	538	1 059	269	891
6	682	900	610	1 234	377	1 021
6	825	1 082	807	1 381	466	1 186
6	915	1 188	897	1 455	592	1 325
6	1 023	1 246	1 005	1 560	646	1 471
8	145	373	163	525	72	481
8	271	529	307	746	163	640
8	407	656	470	977	253	819
8	614	832	578	1 128	361	946
8	777	983	741	1 296	416	1 115
8	885	1 112	849	1 405	542	1 234
8	994	1 180	922	1 419	596	1 366
10	109	341	127	492	109	573
10	218	458	273	655	182	730
10	400	599	364	879	273	827
10	510	755	564	1 034	455	1 117
10	637	905	673	1 192	510	1 281
	783	1 012	783	1 282	582	1 342
	1 019	1 189	855	1 382	710	1 506

3.2 ∇P - Q 关系分析

下面分别用达西定律和 Forchheimer 公式去拟合渗流量 Q 和压力梯度 ∇P 的关系。

图 5 所示分别为隙宽 e 为 2.3、3.1、3.8 mm 下达西定律和 Forchheimer 公式拟合的 ∇P - Q 关系图。而表 4 为对应不同隙宽下各交线长度下的拟合参数表。从表 4 中数据来看, 达西定律公式拟合的相关系数 R^2 大都在 0.86~0.93 之间, 在一定程度仍能较好地刻画渗流量和压力梯度的统计关系; 而 Forchheimer 公式拟合的相关系数 R^2 均达到了 0.99 以上, 说明在本试验条件内, Forchheimer 公式比达西定律能更好地拟合圆盘裂隙内部的渗流量和压力梯度的关系。

3.3 参数 A 、 B 分别与 e 、 w 的关系

Forchheimer 公式与达西定律不同的是多了一个二次项, 意味着非达西渗流的水头损失是由黏滞项和惯性项共同决定^[15], 且惯性项相对越大, 偏离达西流的程度越高。 A 表征岩体本身的渗流能力, B 反映的是渗流的非达西效应。下面通过试验数据得到 A - e 、 A - w 、 B - e 和 B - w 4 种统计关系图 (见图 6) 及统计关系表达式 (见表 5)。

由图 6 与表 5 可知, A 随 e 、 w 的增大而递减, 且 A 分别与 e 、 w 存在幂函数递减关系。同时, B 也分别随隙宽 e 和等效裂隙宽度 w 的增大而递减, 同样呈现出幂函数递减关系。因此, 针对本次试验条件下的圆盘裂隙渗流 Forchheimer 模型与平行板裂隙渗流中 A 和 B 的变化类似, 但存在差异, 差异之一为幂指数大小不同。

3.4 圆盘裂隙 Forchheimer 渗流模型中 A 与 B 的表达式修正

如前所示, 将裂隙概化为圆盘和平行板最大的区别是: 圆盘在沿水流方向过水断面不断变化, 不同流线渗透路径长度不一, 导致圆盘内部各点的流速不等。试验结果表明, 如应用前述等效裂隙宽度与等效渗透路径长度估算方法, 圆盘裂隙的 Forchheimer 渗流模型中 A 和 B 不宜用式 (3) 表达。从表 5 中可以看出, 在不同试验情景下, A 、 B 与 e 、 w 分别均存在很好的统计关系, 据此本文提出一种新的 A 与 B 的确定方法。即通过不同典型条件的渗流试验, 获取代表性试验结果, 分别建立 A 、 B 与 e 和 w 幂函数多元统计关系, 最终获得具有一定可信度的 A 与 B 的修正表达式。根据本文试验结果, 获得如下统计关系:

$$A = 10^{9.14} \times e^{-2.016} \times w^{-1.498} \quad R^2 = 0.96 \quad (7)$$

$$B = 10^{17.006} \times e^{-0.918} \times w^{-4.542} \quad R^2 = 0.91 \quad (8)$$

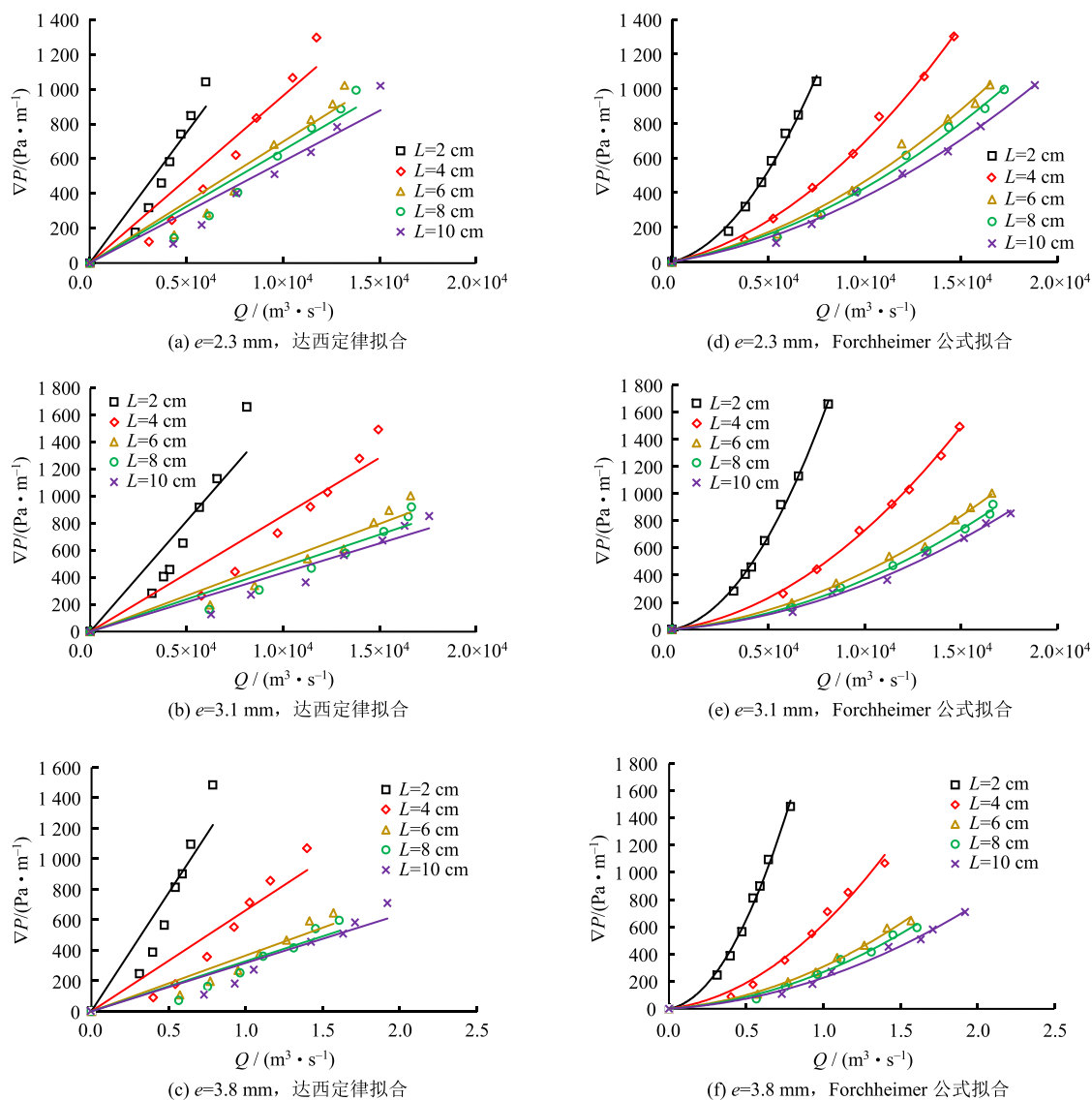
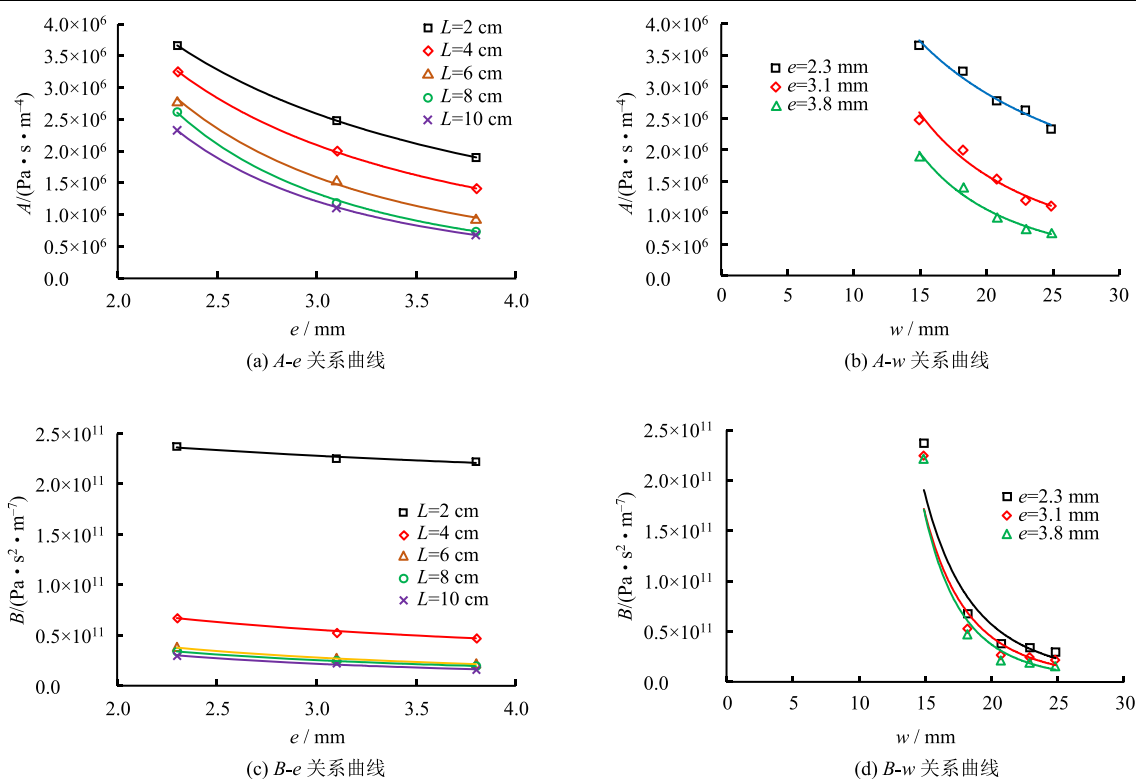
图 5 达西定律和 Forchheimer 公式拟合的 ∇P - Q 图Fig.5 ∇P - Q diagrams of the Darcy law and the Forchheimer formula fitted

表 4 3 种隙宽下两种公式拟合的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of two formulas fitted for three apertures

隙宽 e/mm	达西定律拟合结果			Forchheimer 定律拟合结果		
	L/cm	K $/ (10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-4})$	R^2	A $/ (10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-4})$	B $/ (10^{10} \text{ Pa} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-7})$	R^2
2.3	2	15	0.901	3.66	23.7	0.994
2.3	4	9.61	0.924	3.25	6.76	0.997
2.3	6	6.97	0.936	2.78	3.78	0.995
2.3	8	6.49	0.938	2.63	3.38	0.992
2.3	10	5.85	0.928	2.33	2.95	0.993
3.1	2	16.3	0.856	2.48	22.5	0.997
3.1	4	8.56	0.914	2.00	5.31	0.998
3.1	6	5.31	0.928	1.54	2.69	0.995
3.1	8	4.77	0.924	1.20	2.48	0.997
3.1	10	4.34	0.915	1.11	2.21	0.993
3.8	2	15.5	0.869	1.90	22.2	0.994
3.8	4	6.62	0.887	1.41	4.76	0.986
3.8	6	3.66	0.905	0.93	2.15	0.993
3.8	8	3.27	0.898	0.75	1.94	0.988
3.8	10	3.17	0.900	0.68	1.58	0.992

图6 参数 A 、 B 和 e 、 w 的关系曲线Fig.6 Relationships between parameters A , B and e , w 表5 参数 A 、 B 分别与 e 、 w 的拟合公式Table 5 Formulas for fitting A and B to e and w respectively

关系变量	裂隙几何参数		拟合公式	R^2
	L/cm	e/mm		
A - e	2	—	$A = 1.2 \times 10^7 e^{-1.305}$	0.999
	4	—	$A = 1.44 \times 10^7 e^{-1.666}$	0.999
	6	—	$A = 1.57 \times 10^7 e^{-2.03}$	0.992
	8	—	$A = 2.18 \times 10^7 e^{-2.53}$	0.999
	10	—	$A = 1.93 \times 10^7 e^{-2.468}$	0.999
A - w	—	2.3	$A = 3.95 \times 10^7 w^{-0.873}$	0.976
	—	3.1	$A = 2.32 \times 10^8 w^{-1.66}$	0.976
	—	3.8	$A = 6.31 \times 10^8 w^{-0.98}$	0.980
B - e	2	—	$B = 2.64 \times 10^{11} e^{-0.133}$	0.947
	4	—	$B = 1.21 \times 10^{11} e^{-0.707}$	0.988
	6	—	$B = 9.64 \times 10^{10} e^{-1.12}$	0.987
	8	—	$B = 8.50 \times 10^{10} e^{-1.10}$	0.999
	10	—	$B = 8.35 \times 10^{10} e^{-1.22}$	0.979
B - w	—	2.3	$B = 1.22 \times 10^{16} w^{-4.1}$	0.926
	—	3.1	$B = 4.09 \times 10^{16} w^{-4.58}$	0.909
	—	3.8	$B = 2.15 \times 10^{17} w^{-5.2}$	0.930

从拟合结果来看,统计关系相关性很强,可以期望,如针对实际条件类似的单圆盘裂隙渗流研究,上式可以作为经验公式来直接计算不同情景下的参数 A 和 B 。因为此经验公式是基于直径为 50 cm,隙宽在 2.1~3.8 mm 区间内的圆盘裂隙渗流试验数据,不同直径,尤其是较接近 50 cm 直径的圆盘,该公式的适用性有待进一步确证。为此,选择了直

径为 40 cm 的圆盘,隙宽为 3 mm,交线长度选取为 4、6、8 cm (上面统计关系所依据交线长度上下限之间取值),应用 3 个不同压力梯度,从而获取了相应渗流试验数据。将裂隙参数代入式 (7)、(8) 反求 A 、 B ,再代入式 (2) 求得流量 Q ,并与试验中流量 Q^* 计算相对误差,具体数值如表 6。

从表 6 中数据来看,所有试验情况下的相对误差平均值为 6%,一定程度说明本文中提出的包含圆盘直径变化的经验公式对接近 50 cm 直径圆盘渗流规律刻画具有较好可信度。需要指出的是,本文所提 A 、 B 表达式仅基于直径为 50 cm 的情况,虽已在直径为 40 cm 的圆盘中得到了很好的验证,但还有必要通过更多半径下的渗流试验数据来进一步确证。

另外,对于 Forchheimer 模型中 A 值 (因 B 中含未知参数 β ,故这里仅探讨 A) 还可以先根据式 (3) 计算,然后根据圆盘裂隙 e 与 w 大小,对 A 加以修正,进而获得更接近实际的 A 修正估值,记为 A^* 。根据试验结果,得到下面具体修正关系式:

$$A^* = A \times (10^{0.11} \times e^{0.982} \times w^{-0.538}), \quad R^2 = 0.83 \quad (9)$$

可以看出, R^2 为 0.83,修正系数表达式具有较强的相关性,且与隙宽 e 和等效裂隙宽度 w 均相关。

表 6 直径为 40 cm 的圆盘裂隙渗流试验结果对参数 *A*、*B* 可靠性验证
Table 6 Validation on reliability of parameters *A* and *B* using the experimental results from the disc fracture model with a diameter of 40 cm

<i>e</i> =3 mm, <i>L</i> =4 cm				<i>e</i> =3 mm, <i>L</i> =6 cm				<i>e</i> =3 mm, <i>L</i> =8 cm			
∇P /(Pa·m ⁻¹)	实际 Q^* /(10 ⁻⁵ m ³ ·s ⁻¹)	计算 Q /(10 ⁻⁵ m ³ ·s ⁻¹)	$\frac{\text{计算}Q-\text{实际}Q^*}{\text{实际}Q^*}$ /%	∇P /(Pa·m ⁻¹)	实际 Q^* /(10 ⁻⁵ m ³ ·s ⁻¹)	计算 Q /(10 ⁻⁵ m ³ ·s ⁻¹)	$\frac{\text{计算}Q-\text{实际}Q^*}{\text{实际}Q^*}$ /%	∇P /(Pa·m ⁻¹)	实际 Q^* /(10 ⁻⁵ m ³ ·s ⁻¹)	计算 Q /(10 ⁻⁵ m ³ ·s ⁻¹)	$\frac{\text{计算}Q-\text{实际}Q^*}{\text{实际}Q^*}$ /%
114	2.2	2.1	4	199	3.7	4.0	6	167	3.9	4.4	15
423	4.9	4.7	4	280	5.2	4.9	5	239	5.4	5.5	3
594	6.2	5.7	7	421	6.7	6.3	6	335	7.0	6.8	3

在 3.2 节中，线性定律的统计相关性也较强，即直接用线性关系式来表达也具备较好可靠性。通过利用试验数据对本次提出的修正表达式进行验证，以试验值为标准，分别计算修正前（式（3））修正后（式（9））计算值的相对误差（见表 7）。绘制箱线图（见图 7），可以发现，修正后整体的相对误差大幅减小，平均值和中位数分别为 9%和 8%，比修正前按式（3）计算分别提高 32%和 22%的准确度，故在本试验雷诺数变化范围层流情况下，若采用依据传统的平行板立方定律所给出的式（3）来

计算 *A* 的方法不可靠，而所提出的修正公式来计算 *A* 值具有更高可信度。

4 结 论

（1）针对一定范围变化不同雷诺数下的传统非达西流，达西定律模型在一定程度仍能较好地刻画渗流量和压力梯度的统计关系，但 Forchheimer 模型回归方程相关系数高，比达西定律模型能更好地表达圆盘裂隙内部的渗流量和压力梯度的关系。

（2）试验结果表明，圆盘裂隙渗流规律的 Forchheimer 模型表达式中的参数 *A* 或 *B* 均随着隙宽 *e* 与等效裂隙宽度 *w* 呈幂函数递减；但值得注意的是，如应用本文等效裂隙宽度与等效渗透路径长度估算方法，圆盘裂隙 Forchheimer 渗流模型中 *A* 和 *B* 不宜直接采用平行板裂隙渗流的 *A* 与 *B* 算式表达，而是需用与其差别较大的包含隙宽 *e* 和等效裂隙宽度 *w* 的多元幂函数修正式。同时，也需指出有必要在其后的深入研究中，进行包括隙宽及圆盘直径等更大区间变化取值的渗流试验，以便对所提出的 *A* 与 *B* 算式进一步确认或必要修改。

（3）本研究同时也给出具有广泛适用性的圆盘裂隙渗流规律的研究方法，即针对裂隙几何参数一定变化范围条件下的圆盘裂隙非达西渗流，通过有限的物理模型模拟，可建立 Forchheimer 渗流模型中 *A*、*B* 与隙宽 *e*、等效裂隙宽度 *w* 的统计关系，进而获得相应 *A* 与 *B* 的确定方法。具体来说，通过不同典型条件的渗流试验，获取代表性试验结果，分别建立 *A*、*B* 与隙宽 *e* 和等效裂隙宽度 *w* 多元统计关系，最终可获得具有一定可信度的 *A* 与 *B* 的修正表达式。同时解决了 *B* 中非达西系数 β 难以确定的问题。

本研究可望为岩体中单一裂隙及复杂裂隙网络渗流规律研究及岩体裂隙水动力学工程应用提供一定理论基础与方法借鉴。

表 7 *A* 值修正前后与试验结果的相对误差值
Table 7 Comparison of relative errors between *A* values before and after corrections

<i>e</i> / mm	<i>w</i> / cm	式（3）计算 A -试验 A 试验 A /%	式（9）计算 A -试验 A 试验 A /%
2.3	14.91	83	24
2.3	18.21	68	3
2.3	20.75	73	1
2.3	22.92	65	11
2.3	24.85	72	11
3.1	14.91	10	1
3.1	18.21	12	8
3.1	20.75	27	3
3.1	22.92	48	7
3.1	24.85	47	2
3.8	14.91	22	13
3.8	18.21	14	14
3.8	20.75	14	7
3.8	22.92	29	14
3.8	24.85	30	11

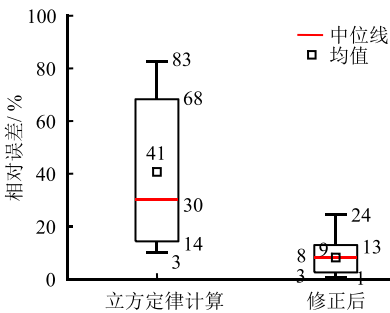


图 7 *A* 值修正前后与试验结果的相对误差对比
Fig.7 Relative errors of the *A* values before and after corrections

参 考 文 献

[1] 张人权. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2011.

- ZHANG Ren-quan. Hydrogeological foundation[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [2] ZIMMERMAN R W, BODVARSSON G S. Hydraulic conductivity of rock fractures[J]. **Transport in Porous Media**, 1996, 23(1): 1-30.
- [3] BEAR J. Dynamics of fluids in porous media[J]. **Engineering Geology**, 1972, 7(2): 174-175.
- [4] 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.
- [5] 张烨, 尹学谦, 陈珂. 粗糙单裂隙高速非达西渗流特性的试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2018, 35(1): 14-18, 23.
- ZHANG Ye, YIN Xue-qian, CHEN Wei. Experimental study on high-speed non-Darcy flow characteristics of rough single fracture[J]. **Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)**, 2018, 35(1): 14-18, 23.
- [6] 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 Ri-cheng, LI Bo, JIANG Yu-jing, et al. Effect of equivalent hydraulic gap and hydraulic gradient on nonlinear seepage characteristics of rock mass fracture network[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(11): 3165-3174.
- [7] 严小三, 钱家忠, 陈冰宇, 等. 大理石平板裂隙水运移试验与模拟研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2014, 29(5): 524-529.
- YAN Xiao-san, QIAN Jia-zhong, CHEN Bing-yu, et al. Experimental and simulation study of water transport in marble plate fracture[J]. **Hydrodynamics Research and Progress (A)**, 2014, 29(5): 524-529.
- [8] 许凯, 雷学文, 孟庆山. 非达西渗流惯性系数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 164-170.
- XU Kai, LEI Xue-wen, MENG Qing-shan. Study on the inertia coefficient of non-Darcy flow[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(1): 164-170.
- [9] ZENG Z, GRIGG R. A criterion for non-Darcy flow in porous media[J]. **Transport in Porous Media**, 2006, 63(1): 57-69.
- [10] CHEN Y F, HU S H, HU R, 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.
- [11] 李文亮, 周佳庆, 贺香兰, 等. 不同围压下破碎花岗岩非线性渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊 1): 140-150.
- LI Wen-liang, ZHOU Jia-qing, HE Xiang-lan, et al. Experimental study on nonlinear seepage characteristics of broken granite under different confining pressures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(Suppl. 1): 140-150.
- [12] PRUESS K. On water seepage and fast preferential flow in heterogeneous, unsaturated rock fractures[J]. **Journal of Contaminant Hydrology**, 1996, 30(3-4): 333-362.
- [13] 刘波, 王明玉, 张敏. 裂隙网络管道模型弥散试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(1): 230-239.
- LIU Bo, WANG Ming-yu, ZHANG Min. Dispersivity experimental investigation based on fracture network pipe model[J]. **Journal of Jilin University (Earth Science Edition)**, 2016, 46(1): 230-239.
- [14] WANG M Y, KULATILAKE, P. H S W, et al. Estimation of REV size and three-dimensional hydraulic conductivity tensor for a fractured rock mass through a single well packer test and discrete fracture fluid flow modeling[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2002, 39(7): 887-904.
- [15] LONG C S, GILMOUR P, WITHERSPOON P A. A model for steady fluid flow in random three dimensional networks of disk-shaped fractured fractures[J]. **Water Resource Research**, 1985, 21(8): 1105-1115.
- [16] 周志芳. 裂隙介质水动力学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- ZHOU Zhi-fang. Principle of hydrodynamics of fractured media[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [17] 李博, 黄嘉伦, 钟振. 三维交叉裂隙渗流传质特性数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3670-3678.
- LI Bo, HUANG Jia-lun, ZHONG Zhen. Numerical simulation study on seepage mass transfer characteristics of three-dimensional cross fissures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(9): 3670-3678.
- [18] 李正伟, 张延军, 张驰. 花岗岩单裂隙渗流传热特性试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3261-3269.
- LI Zheng-wei, ZHANG Yan-jun, ZHANG Chi. Experimental study on seepage and heat transfer characteristics of granite single fracture[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(9): 3261-3269.
- [19] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- ZHANG Zhao-shun, CUI Gui-xiang. Fluid mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.