

不同围压下破碎花岗岩非线性渗流特性试验研究

李文亮^{1,2}, 周佳庆², 贺香兰², 陈益峰², 周创兵^{1,2}

(1. 南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330031 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 随着我国高坝枢纽工程和高水头抽水蓄能电站的大规模兴建, 高坝岩基和高压引水系统围岩将承受极高的渗透水压和水力坡降, 不仅导致岩体渗流产生强烈的非线性, 而且导致岩体发生渗漏、突透水和渗透破坏的风险急剧增大。采用 Triaxial Cell 三轴试验系统, 开展不同围压(1~30 MPa)下阳江破碎花岗岩的非线性渗流试验, 研究高水力梯度条件下破碎花岗岩的非线性渗流特性及其表征方法。试验结果表明, 随着水力梯度的逐步增大, 破碎花岗岩中的水力梯度与渗流流量呈非线性特征; 在围压加载过程中破碎花岗岩的非线性渗流特征逐渐减弱。结合花岗岩的破碎形态和渗透率量级, 提出了破碎花岗岩非线性渗流 3 种可能的成因机制即惯性效应、渗透失稳和固液界面效应。在该基础上分别采用二次函数型 Forchheimer 公式和幂函数型 Izbash 公式对试验结果进行拟合, 结果表明二者均能很好地表征破碎花岗岩的非线性渗流行为。Forchheimer 公式非线性系数既能够表征渗流的惯性效应, 又能表征渗透失稳机制, 其在量值上随着围压的增大呈现正负交替现象, 与围压加载过程中破碎花岗岩裂纹的闭合和扩展密切相关; Izbash 公式非线性系数则既能够表征渗流的惯性效应, 又能表征低渗介质非线性渗流的固液界面效应, 其在量值上与围压存在相关性很好的幂函数关系。研究成果对于深化高渗压、大水力梯度条件下断层破碎带和挤压带非线性渗流规律研究具有重要意义。

关 键 词: 破碎花岗岩; 高渗压; 非线性渗流; Forchheimer 公式; Izbash 公式

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017) 增1-0140-011

Nonlinear flow characteristics of broken granite subjected to confining pressures

LI Wen-liang^{1,2}, ZHOU Jia-qing², HE Xiang-lan², CHEN Yi-feng², ZHOU Chuang-bing^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: As more and more high-dam hydropower and high head pumped storage projects have been constructed in China, the rock foundation of high dam and high pressure water diversion system generally sustain high water pressure and hydraulic gradient. In this circumstance, not only nonlinear flow is prone to occur in rock seepage; but also accompany with leakage, seepage failure and water-inrush risk. This study experimentally investigated the nonlinear flow characteristics of broken granite rock in Yangjiang subjected to a wide range of confining pressures (1-30 MPa) through triaxial cell test system. The characteristics of nonlinear flow in broken granite rock have been elucidated; and its representation methods have been investigated. The results show that nonlinear flow occurs in the broken granite with the increasing hydraulic gradient, while the flow nonlinearity decreases with the increasing confining pressures. Combined with the cracked morphology of broken granite and the magnitude of the permeability, three possible causes triggering the nonlinear flow have been elucidated, i.e. inertial effect, seepage failure and solid-water interaction. Further, the Forchheimer and Izbash equations have been adopted to characterize the nonlinear flow, respectively, which both provide excellent description for the nonlinear flow in broken granite. The nonlinear coefficient of Forchheimer equation experience positive and negative values during the loading process, which is possibly ascribed to the closure and extension of the cracks in the broken granite. The power-law function between the nonlinear coefficients of Izbash equation has been developed by relating them with confining pressures. The results may prove useful in proper understanding of fluid flow through fault zone and compressive zone under high water pressure and hydraulic gradient.

Keywords: broken granite; high water pressure; non-linear flow; Forchheimer equation; Izbash equation

收稿日期: 2016-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51579188, No. 51409198)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51579188, 51409198).

第一作者简介: 李文亮, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 主要从事裂隙岩体水-力耦合试验与数值模拟方面的研究工作。E-mail: wllincu@sina.com

通信作者: 陈益峰, 男, 1974 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土多场耦合机理及岩土介质中的复杂流动特性的研究工作。E-mail: csyfchen@whu.edu.cn

1 引言

随着我国300~800 m水头抽水蓄能电站和200~300 m高坝枢纽工程的大规模兴建,高坝岩基和高压引水系统围岩将承受3 MPa以上的渗透水压和数十之上的水力坡降,导致坝基渗漏、局部突水、隧洞涌水和内水外渗等事件频繁发生^[1-5]。断层破碎带、挤压带和错动带往往是集中的渗流通道,其内发育的破碎岩石在高渗压和高水力梯度作用下易于发生冲蚀、张开、扩展、贯通和劈裂等变形破坏现象,不仅导致渗流呈现强烈的非线性特征,而且诱发渗透失稳和突透水等事故的风险急剧增大^[6]。

尽管受试样尺寸的制约,室内试验仍是研究岩体渗流规律的重要手段,涉及完整岩石^[7-11]和裂隙^[12-14]两类介质。王媛等^[14]开展光滑裂隙高速非达西渗流试验,探讨了因水流惯性效应导致的岩石裂隙非线性渗流运动特征及其判别准则。刘建军等^[15]开展油田岩芯的低速渗流试验发现,低渗岩石渗流因受固液界面效应影响而呈现明显的非线性特征。上述研究表明,无论在低速还是在高速流动状态下完整岩石和裂隙介质中的非线性渗流现象普遍存在,针对破碎岩石非线性渗流规律的试验研究成果则较少,已有的研究多是针对砂岩、泥岩、石灰岩和大理岩等峰后段明显的岩石^[16-17]。孙明贵等^[16]采用瞬态法研究了石灰岩在全应力-应变过程中的渗流特性,结果表明无论峰前还是峰后石灰岩的渗流都不服从线性达西定律。胡大伟等^[18]开展不同围压下峰后破碎大理岩的非线性渗流试验,分析了水力梯度对临界启动压力梯度、固有渗透率和非线性系数演化规律的影响。然而,对于低孔隙率、高强度的脆性岩石(如花岗岩)的相关研究,尤其是高渗压下破碎硬质岩石的非线性渗流规律研究鲜有报道。

岩土介质中的非线性渗流特性广泛采用二次函数型Forchheimer公式和幂函数型Izbash公式表征,国内外针对破碎岩石Forchheimer公式非线性系数 β 的符号和取值问题开展了大量研究,李顺才等^[19]、李天珍等^[20]探讨了破碎岩体非线性系数 β 出现负值的可能原因。繆协兴等^[21]研究了峰后岩石的分岔行为,认为 β 为负是渗流失稳的充分条件。Ma等^[17]系统研究了破碎泥岩、石灰岩和砂岩的非线性系数随围压的变化规律,但采用幂函数型Izbash公式描述破碎岩石非线性渗流及其

相关参数取值问题的研究则未见报道。

综上可知,尽管破碎岩石的渗流规律得到了一定程度的研究,但对于高渗压下破碎硬质岩石的非线性渗流特性及其成因机制还缺乏深入研究,破碎岩石的非线性渗流模型及其参数取值研究更是鲜见报道。本文通过开展不同围压下阳江破碎花岗岩的非线性渗流试验,研究破碎花岗岩的非线性渗流特性随水力梯度和围压的变化规律,分析其非线性渗流的物理成因机制,探讨破碎花岗岩非线性渗流表征公式的适用性及其相关参数随围压的变化规律。试验成果可为工程区扰动岩体和断层破碎带岩体在高渗压、大水力梯度下的渗流和稳定性分析提供重要的理论依据。

2 试验系统和试验方法

2.1 岩样特征

试验岩样取自广东阳江抽水蓄能电站高压隧洞区,见图1(a)。为中粗粒花岗岩,颗粒粒径为1.0~7.0 mm,岩体完整性好,表面无明显裂隙,强度高,脆性强,表观密度为2.61~2.63 g/cm³,孔隙率为0.56%~0.60%。通过显微镜观察和晶粉X射线衍射分析可知,方解石为2%~4%,钾长石为40~44%,钠长石为26~30%,石英为15~17%,黑云母为6~8%,绿泥石为3~5%。按照国际岩石力学学会推荐标准制备标准尺寸为 $\phi 50$ mm $\times$ 100 mm花岗岩试样,见图1(b)。



(a) 广东阳江抽水蓄能电站高压隧洞区钻孔岩芯(ZKy001)



(b) 标准岩石试样

图1 阳江抽水蓄能电站工程区花岗岩试样
Fig.1 Cores and samples of Yangjiang granite

2.2 试验装置

阳江破碎花岗岩非线性渗流试验在武汉大

学与法国里尔科技大学联合研发的Triaxial Cell三轴试验系统上进行。系统由围压、轴压和孔隙流体压力自动伺服装置组成(见图2)。可施加最大围压为60 MPa, 最大轴向偏应力为375 MPa。渗透水压力由PHMP 50~1 000型高精度液压泵提供, 流量泵具有流量大和稳流稳压的特点, 容积为100 mL, 可施加最大渗透压力为50 MPa, 流量范围为0.000 41~66.8 mL/min。渗流试验系统提供应力、应变、位移和泵入流量4种加载方式。此外, 在出口段接入SA2202S-CW型高精度自动电子天平, 天平测量精度为0.01 g, 可以实时测量并记录出口端水流流量。

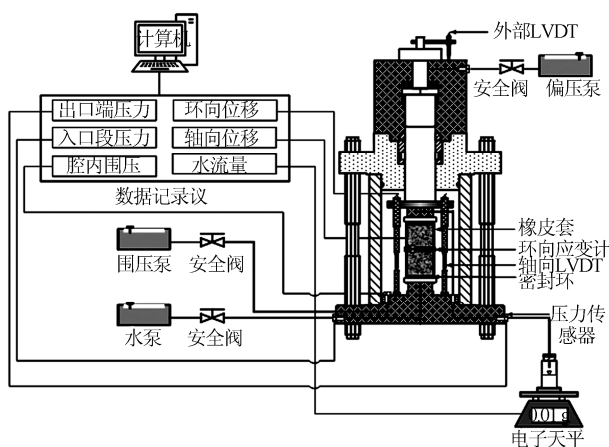


图2 破碎岩石非线性渗流试验系统示意图
Fig.2 Sketch of nonlinear flow test apparatus

2.3 试验步骤

为充分反映破碎花岗岩在饱和条件下的渗流规律, 首先将制备好的试样进行充分饱水: 将试样置于盛有蒸馏水的密闭容器中浸泡30 d, 期间每隔7 d更换一次蒸馏水。破碎花岗岩非线性渗流试验分为岩样破碎和岩样过流两部分。

2.3.1 破碎岩样制备

制样步骤:

① 将饱和标准试样放入特制的氟橡胶套中包裹绝油, 再安装在三轴室内。接上位移传感器与应变测量装置, 其中轴向应变采用2支线性位移传感器(LVDT)量测, 环向应变通过安置在试样轴向中心高度的环向电子应变计测量。

② 合上三轴室, 设置预定围压值为2.0 MPa, 待围压稳定后施加轴向压力, 轴向压力采用泵入流量控制方式, 泵入速率为0.05 mL/min, 直至试样破坏。

③ 试样达到峰值强度破碎后将轴向压力加

载方式切换为位移加载, 设置轴向位移大小为轴向峰值应力对应的位移值, 且在整个渗流试验过程中保持不变, 确保试样平均渗流路径保持不变。

2.3.2 破碎岩样过流试验

试验步骤:

① 为了确保在渗流试验过程中试样处于饱和状态, 在制备好的破碎试样两端设置0.1 MPa的渗透水压差, 对破碎试样进行12 h的2次过流饱和。

② 待试样饱和后开展围压为2.0 MPa下的渗流试验, 采用蒸馏水作为渗流流体, 在试样进口端逐级施加渗透水压力 P (见图3)。出口端接大气压, 开展不同水力梯度下破碎花岗岩非线性渗流试验。待渗透水压稳定后, 通过自动天平测量并记录出口端流量。

③ 待2 MPa围压下的渗流试验结束后将围压增加到5 MPa, 再以2.5 MPa的增量逐级增加到30 MPa。每级围压下重复步骤②, 得到不同围压下破碎花岗岩的水力梯度和渗流流量数据曲线。

试验过程中特定围压下加载的渗透水压始终保持在相对于围压较小的值, 以确保破碎试样在试验过程中的完整性和过流试验的安全性。特定围压下的岩样典型环向应变变化曲线如图3所示(以试样1在15 MPa为例), 由图可知, 在渗透压力梯级加载过程中, 试样环向应变 ε_3 未见明显变化, 表明试验过程中水力耦合效应可忽略不计。

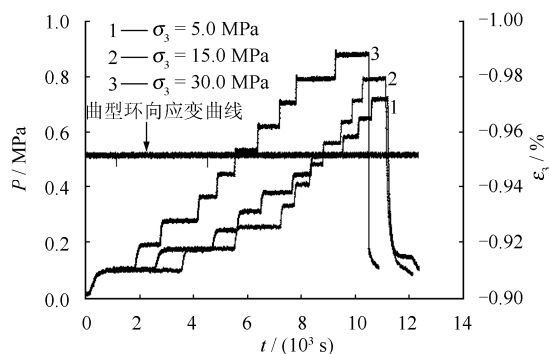


图3 典型水压加载过程曲线及其环向应变变化曲线
Fig.3 Typical water pressure loading curves and corresponding lateral strain curve

3 试验结果及分析

阳江破碎花岗岩非线性渗流试验采用3组试样, 每组试样开展12级围压荷载($P_c = 1 \sim 30$ MPa)作用下不同水力梯度的渗流试验, 获取

了数百组破碎花岗岩水力梯度和渗流流量数据。渗流试验结束后破碎花岗岩试样见图 4。由图可见, 花岗岩试样破碎后形成了多条以宏观纵向裂纹为主、并伴随有少量细观横向裂纹、局部存在密集破碎区域的碎裂形态, 部分纵向裂纹甚至贯通试样端面。

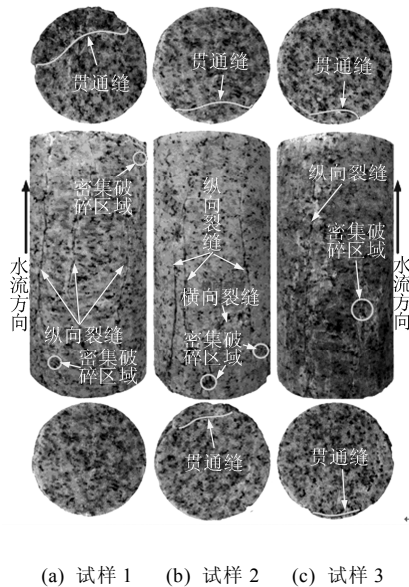


图 4 三轴压缩破坏后破碎花岗岩试样形态

Fig.4 Morphology of broken granite rock samples created after triaxial compression tests

破碎花岗岩试样在不同围压荷载作用下的水力梯度 ∇P 和渗流流量 Q 关系曲线如图5所示。从图中可以看出, 随着水力梯度 ∇P 的增大, ∇P - Q 曲线凸向 ∇P 轴, 渗流流量 Q 的增加高于线性递增而呈现显著的非线性特征这种非线性线性在本文试验中最为典型, 是本文研究的重点。此外, 试样1在部分较高围压(10~20 MPa)和试样3在最高围压(30 MPa)下 ∇P - Q 曲线凸向 Q 轴, 即随着水力梯度 ∇P 的增大, 过流流量 Q 的增加低于线性递增, 这种非线性渗流特征已得到广泛研究^[22-23], 主要是由于显著的水流惯性效应引起的额外压力损失, 从而导致渗流的非线性。对比同一水力梯度下的试验结果可以发现, 破碎岩样的渗流流量随着围压的增大而逐渐减小, 尤其在围压加载初期, 流量减少趋势十分明显; 随着围压的增大, 破碎岩石渗流非线性呈逐渐减弱的趋势。

针对试验过程中出现的渗流流量 Q 的增加高于线性递增而呈非线性流动的特征, 结合图4花岗岩破碎后的形态, 推断其可能的原因为渗透失稳: 随着渗透水压力的增加, 破碎花岗岩中的细

小颗粒(尤其是破碎区)在高渗透水压力作用下, 经由与端面贯通的裂纹, 被携带出试样, 造成试样内部渗流通道增大, 引起渗流流量呈非线性加速增长, 破碎花岗岩试样发生渗透失稳。已有研究表明, 渗透失稳条件下的渗流规律可采用二次函数型Forchheimer公式分析^[16-21]。此外, 渗流流量的增加高于线性递增的非线性渗流特征在低渗岩石^[15, 24]和微纳米级裂隙^[22-24]中也普遍存在, 主要由于流动空隙微小, 固液界面效应显著, 导致水流呈现出类似非牛顿流体的特征, 从而呈现出上述非线性流动行为。针对这种由固液界面效应导致的非线性流动行为, 国内外学者多采用幂函数型的Izbash公式加以描述和表征^[12, 25]。

下文分别针对渗透失稳和固液界面效应这两种可能的成因机制, 探讨破碎花岗岩的非线性渗流特性及其宏观表征方法。

3.1 基于二次函数型公式的非线性渗流特性

Forchheimer公式已被广泛应用于描述孔隙介质和裂隙介质中因水流惯性效应导致的非线性渗流特性^[14, 22, 26], 具有明确的理论基础, 可由流体力学的N-S方程简化得到

$$\left. \begin{aligned} -\nabla P &= A Q + B Q^2 \\ A &= \frac{\mu}{k A_0}; B = \frac{\beta \rho}{A_0^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: A 、 B 分别为Forchheimer公式线性项和非线性项系数; k 为破碎岩石固有渗透率(m^2); μ 为流体的动力黏滞系数($\text{Pa}\cdot\text{s}$); ρ 为流体密度(kg/m^3); $A_0 (= \pi d^2/4)$ 为破碎岩石过流面积(m^2); d 为试样直径(m)。

当Forchheimer方程被拓展用于表征因渗透失稳导致的非线性渗流行为时, 其非线性系数 β 为负值。采用Forchheimer公式拟合破碎花岗岩非线性渗流试验数据, 其拟合曲线如图5所示, 各级围压下的拟合系数值见表1。由图、表可知, Forchheimer方程能够很好地表征破碎花岗岩中的非线性渗流特性, 其拟合相关系数 R^2 均大于0.94。根据拟合得到的Forchheimer公式线性项系数 A 和非线性项系数 B , 由式(1)中第二式可分别求得破碎岩石在各级围压下的固有渗透率 k 和非线性系数 β , 数值见表1。

为了进一步验证破碎花岗岩的非线性渗流流态, 探讨其随围压荷载的变化规律, 引入表观渗透率 k_a 的概念,

$$k_a = \mu Q / A_0 / (-\nabla P) \quad (2)$$

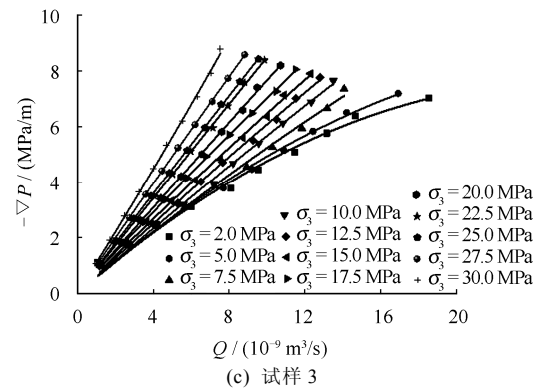
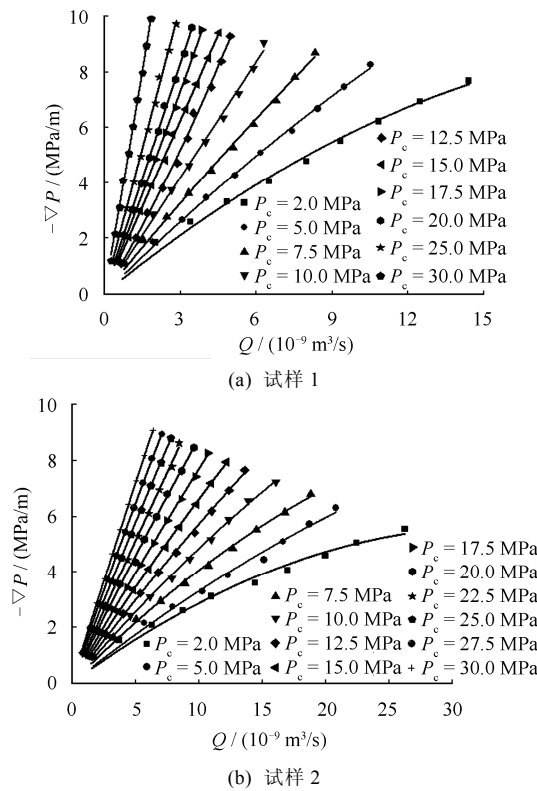


图5 二次函数型 Forchheimer 公式对不同围压下水力梯度和流量拟合曲线

Fig.5 Hydraulic gradients under different cell pressures and flow fitting curves using Forchheimer equation

表观渗透率 k_a 是假定线性达西定律成立条件下, 由该处的水力梯度和渗流流量求得。图6为无量纲化后的表观渗透率(k_a/k)随水力梯度的变化曲线。从图中可以看出, 同一围压下随着水力梯度的增大, 破碎花岗岩的表观渗透率总体上呈

表 1 破碎花岗岩非线性渗流系数拟合值

Table 1 Fitting values of nonlinear seepage coefficient of fractured granite

试样 (曲线) 编号	Forchheimer 公式					Izbash 公式			P_c / MPa
	$A / (\text{kg/s/m}^5)$	$B / (\text{kg/m}^8)$	k / m^2	β / m^{-1}	R^2	λ	m	R^2	
1(1)	7.43×10^8	-1.53×10^{22}	6.10×10^{-16}	-5.88×10^{13}	0.98	1.26×10^{12}	0.69	0.99	2.00
1(2)	8.93×10^8	-1.14×10^{22}	5.08×10^{-16}	-4.38×10^{13}	0.99	2.52×10^{13}	0.82	0.99	5.00
1(3)	1.11×10^9	-1.06×10^{22}	4.08×10^{-16}	-4.08×10^{13}	0.99	8.88×10^{13}	0.87	0.99	7.50
1(4)	1.38×10^9	1.33×10^{21}	3.29×10^{-16}	5.12×10^{12}	0.99	3.98×10^{14}	0.94	0.99	10.00
1(5)	1.51×10^9	6.79×10^{22}	3.01×10^{-16}	2.62×10^{14}	0.99	4.54×10^{15}	1.05	0.99	12.50
1(6)	2.06×10^9	1.35×10^{21}	2.20×10^{-16}	5.22×10^{12}	0.99	1.60×10^{15}	0.99	0.99	15.00
1(7)	2.31×10^9	3.44×10^{22}	1.96×10^{-16}	1.32×10^{14}	0.99	2.27×10^{15}	1.00	0.99	17.50
1(8)	2.71×10^9	1.16×10^{22}	1.67×10^{-16}	4.45×10^{13}	0.99	2.94×10^{15}	1.00	0.99	20.00
1(9)	3.44×10^9	-2.66×10^{21}	1.32×10^{-16}	-1.02×10^{13}	0.99	2.99×10^{15}	0.99	0.99	25.00
1(10)	4.98×10^9	1.91×10^{23}	9.11×10^{-17}	7.36×10^{14}	0.99	4.17×10^{16}	1.10	0.99	30.00
2(11)	3.35×10^8	-4.99×10^{21}	1.35×10^{-15}	-1.92×10^{13}	0.97	3.30×10^{11}	0.63	0.98	2.00
2(12)	3.62×10^8	-3.23×10^{21}	1.26×10^{-15}	-1.24×10^{13}	0.98	4.60×10^{12}	0.77	0.99	5.00
2(13)	4.59×10^8	-5.51×10^{21}	9.88×10^{-16}	-2.12×10^{13}	0.99	8.58×10^{12}	0.79	0.99	7.50
2(14)	5.33×10^8	-5.05×10^{21}	8.51×10^{-16}	-1.94×10^{13}	0.99	4.31×10^{13}	0.87	0.99	10.00
2(15)	6.15×10^8	-4.58×10^{21}	7.37×10^{-16}	-1.76×10^{13}	0.99	8.71×10^{13}	0.90	0.99	12.50
2(16)	7.10×10^8	-5.13×10^{21}	6.39×10^{-16}	-1.97×10^{13}	0.99	2.11×10^{14}	0.94	0.99	15.00
2(17)	8.06×10^8	-3.96×10^{21}	5.62×10^{-16}	-1.52×10^{13}	0.99	4.57×10^{14}	0.97	0.99	17.50
2(18)	9.42×10^8	-6.82×10^{21}	4.81×10^{-16}	-2.62×10^{13}	0.99	4.12×10^{14}	0.96	0.99	20.00
2(19)	1.04×10^9	-4.69×10^{21}	4.36×10^{-16}	-1.80×10^{13}	0.99	5.49×10^{14}	0.97	0.99	22.50
2(20)	1.19×10^9	-9.02×10^{21}	3.80×10^{-16}	-3.47×10^{13}	0.99	7.40×10^{14}	0.98	0.99	25.00
2(21)	1.34×10^9	-1.21×10^{22}	3.37×10^{-16}	-4.68×10^{13}	0.99	8.86×10^{14}	0.98	0.99	27.50
2(22)	1.46×10^9	-7.65×10^{21}	3.09×10^{-16}	-2.95×10^{13}	0.99	1.52×10^{15}	1.00	0.99	30.00
3(23)	5.56×10^8	-8.59×10^{21}	8.16×10^{-16}	-3.31×10^{13}	0.94	1.27×10^{11}	0.55	0.97	2.00
3(24)	5.94×10^8	-1.01×10^{22}	7.64×10^{-16}	-3.86×10^{13}	0.99	3.60×10^{12}	0.73	0.96	5.00
3(25)	5.76×10^8	-5.53×10^{21}	7.88×10^{-16}	-2.13×10^{13}	0.99	1.61×10^{13}	0.81	0.99	7.50
3(26)	5.92×10^8	-2.44×10^{21}	7.66×10^{-16}	-9.40×10^{12}	0.99	3.13×10^{13}	0.84	0.99	10.00
3(27)	6.38×10^8	-2.96×10^{21}	7.11×10^{-16}	-1.14×10^{13}	0.99	4.96×10^{13}	0.87	0.99	12.50
3(28)	6.83×10^8	-3.54×10^{21}	6.64×10^{-16}	-1.37×10^{13}	0.99	1.44×10^{14}	0.92	0.99	15.00
3(29)	7.49×10^8	-4.60×10^{21}	6.05×10^{-16}	-1.78×10^{13}	0.99	2.76×10^{14}	0.95	0.99	17.50
3(30)	7.76×10^8	-8.90×10^{20}	5.84×10^{-16}	-3.43×10^{12}	0.99	5.75×10^{14}	0.98	0.99	20.00
3(31)	8.61×10^8	-1.14×10^{21}	5.27×10^{-16}	-4.40×10^{12}	0.99	6.45×10^{14}	0.99	0.99	22.50
3(32)	9.07×10^8	-2.33×10^{21}	5.00×10^{-16}	-8.99×10^{12}	0.99	7.01×10^{14}	0.99	0.99	25.00
3(33)	1.00×10^9	-3.64×10^{21}	4.52×10^{-16}	-1.40×10^{13}	0.99	7.56×10^{14}	0.99	0.99	27.50
3(34)	1.07×10^9	1.16×10^{22}	4.22×10^{-16}	4.41×10^{13}	0.99	1.94×10^{15}	1.03	0.99	30.00

逐步增大的趋势, 进一步说明破碎花岗岩中流动的非线性; 随着围压的逐步增大, 表观渗透率随水力梯度的增大而增大的趋势逐步减弱, 最终趋于水平, 表明围压的增大限制了破碎岩石非线性渗流的发展, 主要是由于围压的增大, 导致纵向裂纹闭合, 使得渗透失稳更难以发生和发展。

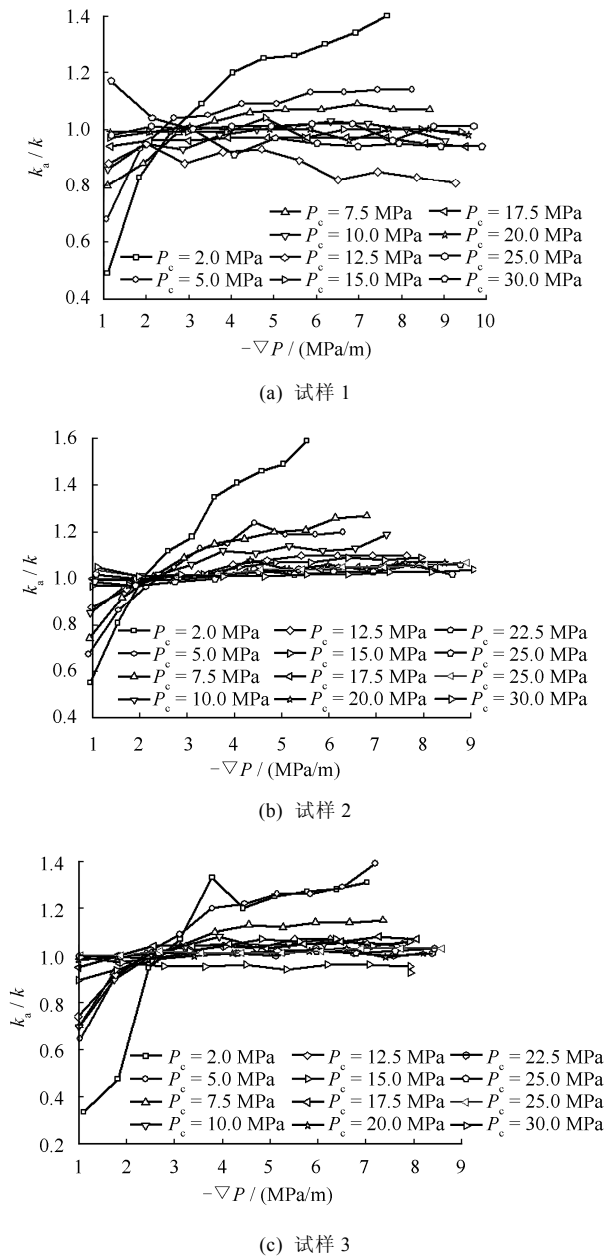


图6 表观渗透率与固有渗透率之比随水力梯度变化曲线

Fig.6 Change curves of apparent permeability to intrinsic permeability as a function of pressure gradient

图7为固有渗透率 k 与围压 P_c 的关系曲线。从图中可以看出, 固有渗透率 k 与围压 P_c 呈单调反比关系, 即随着围压增加, 固有渗透率 k 逐渐减小, 且减小趋势逐步减弱。这种变化趋势表明破碎岩石的渗透性在低应力环境对应力更为敏感。此

外, 图7中试样2的固有渗透率随围压变化幅度在3组试样中最大, 表明其渗透率对围压最为敏感。结合图4分析可知, 主要是相较于试样1和试样3, 试样2的宏观纵向裂纹更多、缝宽更大, 在围压加载过程中其宏观纵向裂纹闭合显著, 渗透率随围压变化更为敏感。

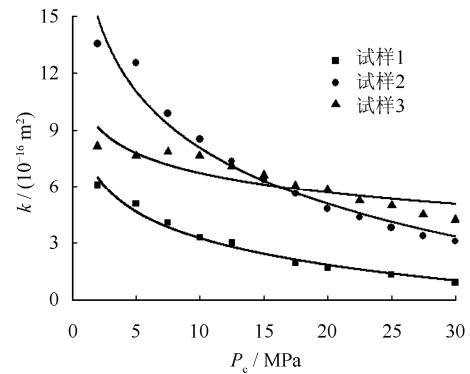


图7 固有渗透率和围压拟合曲线

Fig.7 Fitted curves of intrinsic permeability and confining stress

采用如下对数函数关系对固有渗透率 k 与围压 P_c 的关系进行拟合:

$$k = a + b \ln P_c \quad (3)$$

式中: a , b 为拟合系数。破碎花岗岩固有渗透率和围压的拟合曲线见图7, 拟合参数值见表2。由图表可知, 破碎花岗岩的固有渗透率与围压成相关度很好的对数函数关系式。

表2 公式(2)拟合系数表

Table 2 Best-fitted coefficients for equation (2)			
试样编号	a	b	R^2
1	7.94×10^{-16}	-2.04×10^{-16}	0.98
2	1.80×10^{-15}	-4.31×10^{-16}	0.96
3	1.02×10^{-15}	-1.52×10^{-16}	0.76

图8为非线性系数随围压的变化关系曲线。从图中可以看出, 试样1的非线性系数 β 值正负交替出现, 试样2的非线性系数 β 全部为负, 试样3的非线性系数 β 除最高围压下为正之外, 其余均小于0。在围压加载过程中, 破碎岩石非线性系数存在正负交替的现象与裂纹的演化规律密切相关: 对于破碎岩石, 在围压加载过程中纵向裂纹逐渐压缩闭合, 而横向裂纹却有可能逐渐萌生、扩展和连通, 这两组裂纹的变化对破碎岩石非线性渗流的作用机制完全相反, 当裂纹闭合占主导时导致渗流路径愈发曲折, 惯性效应增强, 从而导致非线性系数 β 为正; 当裂纹扩展占

主导时,则导致渗流通道贯通发展,增加渗透失稳的可能性,从而导致非线性系数 β 为负。

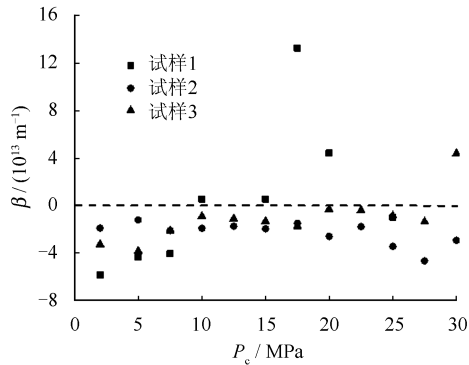


图8 非线性渗流系数 β 随围压变化曲线
Fig.8 Variation curves of nonlinear flow coefficient β with confining stress

由上分析可知,固有渗透率取决于破碎花岗岩的宏观裂纹,而宏观裂纹又以纵向裂纹为主,因此随着围压的增大,固有渗透率呈单调下降。然而,在围压加载过程中横向裂纹萌生、扩展和连通,虽然对固有渗透率影响较小,但对破碎岩石非线性渗流的发生和发展产生较大影响,导致非线性系数 β 在围压加载过程中呈现正负交替的现象。

3.2 基于幂函数型公式的非线性渗流特性

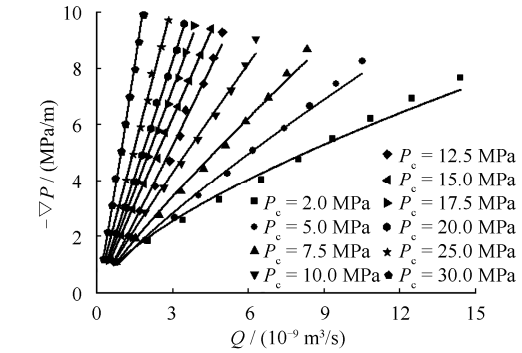
幂函数型Izbash公式也已被广泛应用于表征因水流惯性效应导致的非线性渗流特性,表达式为

$$-\nabla P = \lambda Q^m \quad (4)$$

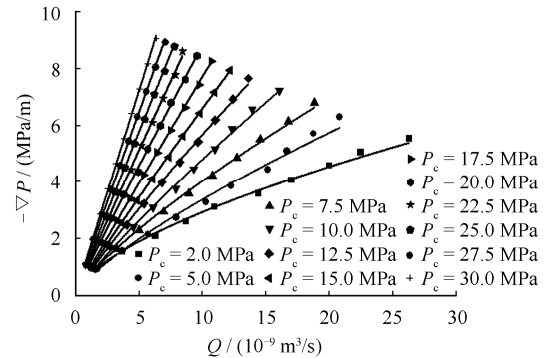
式中: λ 、 m 为经验系数。当 $m=1\sim 2$ 之间取值时,式(3)表征因显著惯性效应导致的非线性渗流特性;当 $m=1$ 时,式(3)退化为线性达西定律,也常用于表征低渗岩石介质中因显著的固液界面效应导致的非线性渗流,此时 m 的取值范围为 $0\sim 1$ ^[12]。

通过章节3.1的分析可知,破碎花岗岩的固有渗透率量级在 $10^{-17}\sim 10^{-15} \text{ m}^2$,渗透率较低,可采用幂函数型Izbash公式对其非线性渗流试验数据进行分析 and 讨论,拟合曲线如图9所示,各级围压下的拟合系数值见表1。由图9和表1可知,Izbash公式同样能够很好地表征破碎花岗岩中的非线性渗流特性,其拟合相关系数 R^2 均大于0.97。拟合系数 λ 数量级在 $10^{11}\sim 10^{16}$ 之间,拟合系数 m 则在0.55~1.10之间。

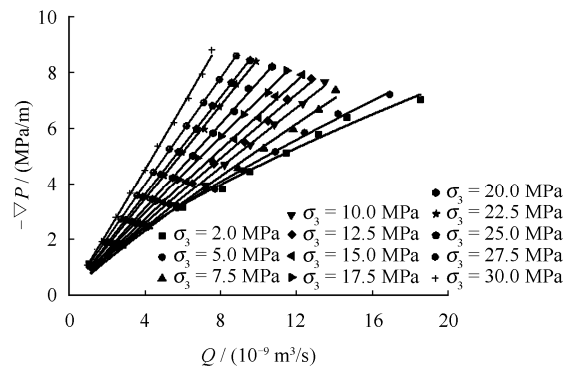
图10为幂函数型Izbash公式系数 λ 随围压 P_c 的关系曲线。从图中可以看出,系数 λ 随围压 P_c 的增加而逐渐增大,随着围压 P_c 进一步增加,其



(a) 试样 1



(b) 试样 2



(c) 试样 3

图9 幂函数型 Izbash 公式对不同围压下水力梯度和流量拟合曲线
Fig.9 Hydraulic gradients under different cell pressures and flow fitting curves using Izbash equation

增加趋势有所减缓,总体上系数 λ 增加了4个数量级,孟如真等^[27]、Chen等^[28-29]、Izbash等^[30]、Yamada等^[31]指出 λ 在一定程度上反映了介质的过流能力,而由章节3.1分析可知,破碎试样的过流能力(即固有渗透率 k)取决于宏观纵向裂纹。在围压加载初期,宏观纵向裂纹对围压的变化较为敏感,过流能力迅速下降,导致系数 λ 迅速增大;随着围压进一步增大,宏观纵向裂纹闭合愈加困难,过流能力下降速率减缓,导致系数 λ 上升缓慢。采用如下幂函数形式公式拟合系数 λ 随围压的变化特征:

$$\lambda = a_1 P_c^{a_2} \quad (5)$$

式中: a_1 、 b_1 为拟合系数。破碎花岗岩 Izbash 公式系数 λ 和围压 P_c 的拟合曲线如图 10 所示, 拟合参数值见表 3。由图 10、表 3 可知, 破碎花岗岩的 Izbash 公式系数 λ 与围压 P_c 成相关度很好的幂函数关系式。

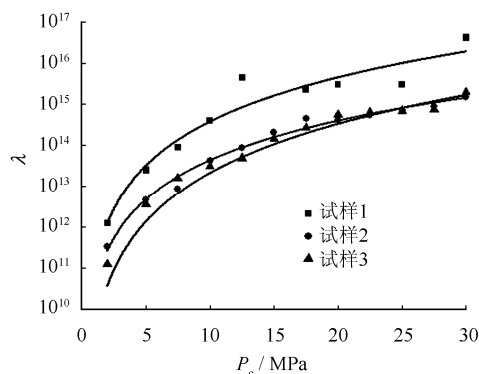


图 10 非线性系数 λ 与围压拟合曲线

Fig.10 Fitting curves of nonlinear flow coefficient λ and confining stress

表3 幂函数型 Izbash 公式相关拟合公式系数

Table 3 Correlation coefficients of equation using Izbash of power foundation type

试样编号	$\lambda = a_1 P_c^{b_1}$			$m = a_2 P_c^{b_2}$			$\lambda = \xi m^\eta$		
	a_1	b_1	R^2	a_2	b_2	R^2	ξ	η	R^2
1	1.06×10^{11}	3.56	0.93	0.61	0.17	0.90	2.19×10^{15}	20.43	0.99
2	2.85×10^{10}	3.18	0.98	0.58	0.17	0.97	8.82×10^{14}	18.45	0.98
3	1.25×10^{10}	3.34	0.99	0.50	0.22	0.97	6.88×10^{14}	15.68	0.99

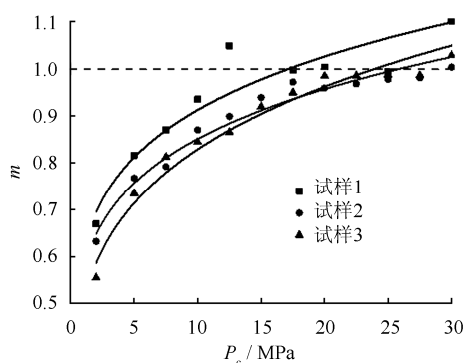


图 11 非线性系数 m 与围压拟合曲线

Fig.11 Fitting curves of nonlinear flow coefficient m and confining stress

由图 11 和表 3 可知, 破碎花岗岩的 Izbash 公式系数 m 与围压 P_c 也存在着相关度很好的幂函数关系。

由以上分析可知, 幂函数型 Izbash 公式中两个非线性系数 λ 和 m 均与围压 P_c 存在着相关性很好的幂函数关系, 可以推断出这两个非线性系数之间同样也存在着如下幂函数关系式:

$$\lambda = \xi m^\eta \quad (7)$$

式中: ξ 、 η 为拟合系数。其拟合曲线如图 12 所

由幂函数型 Izbash 公式 (4) 可知, 非线性系数 m 表征了渗流非线性的偏离程度, 当其值越接近于 1, 渗流流态则越趋近于线性达西定律, 反之则非线性越显著。图 11 为系数 m 随围压 P_c 的变化曲线。从图中可以看出, 系数 m 随围压 P_c 的增加而增加 (0.55→1.10), 并最终趋近于 1, 表明随着围压的增大, 破碎花岗岩的非线性渗流特征逐渐减弱, 这一结论与章节 3.1 一致。此外, 多数非线性系数 m 值均小于 1, 表明在各级围压荷载作用下破碎花岗岩的流动呈现出类似于低渗介质中的非线性渗流特征。同样地, 可采用幂函数形式公式对系数 m 和围压 P_c 进行拟合:

$$m = a_2 P_c^{b_2} \quad (6)$$

式中: a_2 、 b_2 为拟合系数。破碎花岗岩 Izbash 公式系数 m 和围压 P_c 的拟合参数值见表 3。

示, 相关拟合参数见表 3。式 (5)~(7) 为基于幂函数型 Izbash 公式的非线性系数取值提供了一种有效的方法。

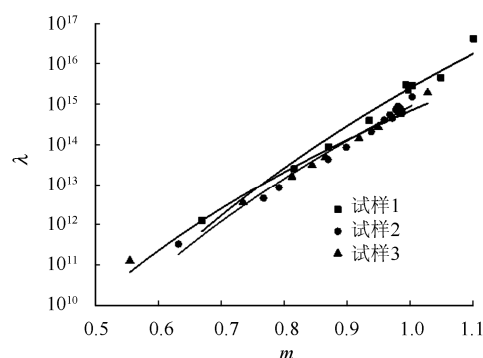


图 12 幂函数型 Izbash 方程非线性系数 λ 和 m 关系曲线

Fig.12 Relationships between nonlinear flow coefficients of Izbash equation

3.3 讨论

从理论上讲, Forchheimer 公式具有明确的理论基础, 在过流通道不发生明显变化的假设条件下, 可由流体力学的 N-S 方程简化得到, 系数 k 、 β 不随水力梯度及渗流流量变化, Izbash 公式则是纯粹的经验拟合公式, 其物理意义还不够明

确,部分研究还表明^[12, 28-29, 31],其 λ 、 m 受水力梯度及渗流流量的影响显著。本文采用这两个公式(二次函数型和幂函数型)表征破碎花岗岩的非线性流动特性,其非线性系数均是某种平均意义下的物理量,因此在特定围压下为常值。

图 13 为这两类公式对试验数据拟合相关系数 R^2 的变化情况。从图中可以看出,二次函数型的 Forchheimer 公式和幂函数型的 Izbash 公式都能很好地表征破碎花岗岩的非线性流动规律。从相关系数上看, Izbash 公式略优于 Forchheimer 公式。此外,相对于 Forchheimer 方程, Izbash 公式的非线性系数与围压存在更好的相关关系,且其拟合系数随试样个体差异性的波动幅度较小(见表 3)。需要说明的是, Forchheimer 公式和 Izbash 公式在描述破碎花岗岩渗流特性上也存在相互对应的关系,即 Forchheimer 公式非线性系数 $\beta < 0$ 时,对应于 Izbash 公式非线性系数 $m < 1$ 。

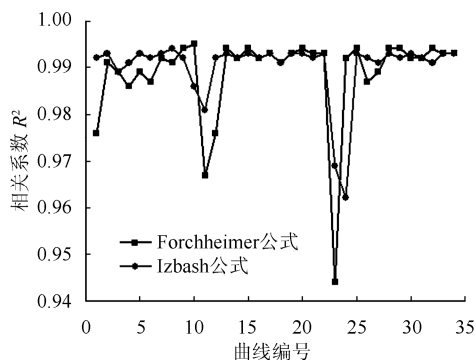


图 13 Forchheimer 公式和 Izbash 公式拟合相关系数
Fig.13 Fitting the correlation coefficients R^2

4 结 论

(1) 在高水力梯度作用下破碎花岗岩内的渗流流态呈现出显著的非线性流动特征,即围压荷载加载过程中其渗流非线性程度逐渐减弱。

(2) 破碎花岗岩的非线性渗流成因机制主要有惯性效应、渗透失稳和固液界面效应3种。基于惯性效应和渗透失稳机制提出的 Forchheimer 公式和基于惯性效应和固液界面效应提出的 Izbash 公式均能很好地表征破碎花岗岩的非线性流动特征。

(3) 采用 Forchheimer 公式表征时,固有渗透率 k 随围压呈对数型下降,其值主要取决于破碎花岗岩的宏观纵向裂纹。围压加载过程中非线性系数 β 存在正负交替的现象,与加载过程中裂纹的闭合和扩展密切相关。

(4) 采用 Izbash 公式表征时,在围压加载过程中,其非线性系数 λ 增加了4个数量级,非线性系数 m 逐渐趋近于1,二者均与围压呈相关性很好的幂函数关系。

参 考 文 献

- [1] 王媛, 王飞, 倪小东. 基于非稳定渗流随机有限元的隧洞涌水量预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 1986—1994.
WANG Yuan, WANG Fei, NI Xiao-dong. Prediction of water inflow in tunnel based on stochastic finite element of unsteady seepage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(10): 1986—1994.
- [2] BASAK P. Steady non-Darcian seepage through embankments[J]. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 1976, 102(4): 435—443.
- [3] 余诗刚, 林鹏. 中国岩石工程若干进展与挑战[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 433—457.
SHE Shigang, LIN Peng. Some developments and challenging issues in rock engineering field in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(3): 433—457.
- [4] 张巍, 陈云长, 黄立财, 等. 高压隧洞内水外渗三维有限元分析与渗透稳定性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(5): 212—217.
ZHANG Wei, CHEN Yun-chang, HUANG Li-cai, et al. 3D finite element analysis of seepage from a high pressure tunnel and study on its permeation stability[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2015, 13(5): 212—217.
- [5] CHEN Y F, HONG J M, ZHENG H K, et al. Evaluation of groundwater leakage into a drainage tunnel in Jinping-I arch dam foundation in Southwestern China: A case study[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(3): 961—979.
- [6] 周毅, 李术才, 李利平, 等. 隧道充填型岩溶管道渗透失稳突水机制三维流-固耦合模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1739—1749.
ZHOU Yi, LI Shu-cai, LI Li-ping, et al. 3D fluid-solid

- coupled model test on water-inrush in tunnel due to seepage from filled karst conduit[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(9): 1739—1749.
- [7] BEAR J, BACHMAT Y. Introduction to modeling of transport phenomena in porous media[M]. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- [8] SMEULDERS D M J, EGGELS R, Van DONGEN M E H. Dynamic permeability: reformulation of theory and new experimental and numerical data[J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 1992, 245: 211—227.
- [9] SPRINGER D S, LOAICIGA H A, CULLEN S J, et al. Air permeability of porous materials under controlled laboratory conditions[J]. **Ground Water**, 1998, 36(4): 558—565.
- [10] 胡大伟, 周辉, 潘鹏志, 等. 砂岩三轴循环加卸载条件下的渗透率研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2749—2754.
- HU Da-wei, ZHOU Hui, PAN Peng-zhi, et al. Study of permeability of sandstone in triaxial cyclic stress tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2749—2754.
- [11] 王伟, 徐卫亚, 王如宾, 等. 低渗透岩石三轴压缩过程中的渗透性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 40—47.
- WANG Wei, XU Wei-ya, WANG Ru-bin, et al. Permeability of dense rock under triaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(1): 40—47.
- [12] WEN Z, HUANG G H, ZHAN H B. Non-Darcian flow in a single confined vertical fracture toward a well[J]. **Journal of Hydrology**, 2006, 330(3): 698—708.
- [13] 李毅. 岩石裂隙的非饱和和渗透特性及其演化规律研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2254—2262.
- LI Yi. Unsaturated hydraulic properties of rock fractures and their variation law[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(8): 2254—2262.
- [14] 王媛, 顾智刚, 倪小东, 等. 光滑裂隙高流速非达西渗流运动规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1404—1408.
- WANG Yuan, GU Zhi-gang, NI Xiao-dong, et al. Experimental study of Non-Darcy water flow through a single smooth fracture[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(7): 1404—1408.
- [15] 刘建军, 刘先贵, 胡雅祚. 低渗透岩石非线性渗流规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 556—561.
- LIU Jian-jun, LIU Xian-gui, HU Ya-ren. Study on nonlinear seepage of rock of low permeability[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(4): 556—561.
- [16] 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.
- SUN Ming-gui, HUANG Xian-wu, LI Tian-zhen, et al. Seepage properties of non-Darcy flow in complete failure process of limestone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(3): 484—491.
- [17] MA D, MIAO X X, CHEN Z Q, et al. Experimental investigation of seepage properties of fractured rocks under different confining pressures[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2013, 46(5): 1135—1144.
- [18] 胡大伟, 周辉, 谢守益, 等. 峰后大理岩非线性渗流特征及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 451—458.
- HU Da-wei, ZHOU Hui, XIE Shou-yi, et al. Research on character and mechanism of nonlinear seepage in post-peak marble[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(3): 451—458.
- [19] 李顺才. 破碎岩体非 Darcy 渗流的非线性动力学研究[博士学位论文D]. 徐州: 中国矿业大学, 2006.
- LI Shun-cai. Nonlinear dynamical study on non-Darcy flow in broken rock[Ph. D. Thesis D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2006.
- [20] 李天珍, 马林, 张连英. 泥岩非Darcy流渗透特性指标正负号探讨[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(4): 481—485.

- LI Tian-zhen, MA Lin, ZHANG Lian-ying. Discussion about positive or negative sign of permeability indexes in non-Darcy flow of mudstone[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2007, 24(4): 481—485.
- [21] 缪协兴, 陈占清, 茅献彪, 等. 峰后岩石非 Darcy 渗流的分岔行为研究[J]. 力学学报, 2003, 35(6): 660—667.
- MIAO Xie-xing, CHEN Zhan-qing, MAO Xian-biao, et al. The bifurcation of non-Darcy flow in post-failure rock[J]. **Acta Mechanica Sinica**, 2003, 35(6): 660—667.
- [22] ZHOU J Q, HU S H, FANG S, et al. Nonlinear flow behavior at low Reynolds numbers through rough-walled fractures subjected to normal compressive loading[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2015, 80: 202—218.
- [23] 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.
- [24] LIU H H, LAI B T, CHEN J H. Unconventional spontaneous imbibition into shale matrix: Theory and a methodology to determine relevant parameters[J]. **Transport in Porous Media**, 2016, 111(1): 41—57.
- [25] 李健, 黄冠华, 文章, 等. 两种不同粒径石英砂中非达西流动的实验研究[J]. 水利学报, 2008, 39(6): 726—732.
- LI Jian, HUANG Guan-hua, WEN Zhang, et al. Experimental study on non-Darcian flow in two kinds of media with different diameters[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2008, 39(6): 726—732.
- [26] 许凯, 雷学文, 孟庆山, 等. 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, LIE Xue-wen, MENG Qing-shan, et al. Study of inertial coefficient of non-Darcy seepage flow[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(1): 164—170.
- [27] 孟如真, 胡少华, 陈益峰, 等. 高渗压条件下基于非达西流的裂隙岩体渗透特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1756—1764.
- MENG Ru-zhen, HU Shao-hua, CHEN Yi-feng, et al. Permeability of non-Darcy flow in fractured rock mass under high seepage pressure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(9): 1756—1764.
- [28] 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.
- [29] CHEN Y F, LIU M M, HU S H, et al. Non-Darcy's law-based analytical models for data interpretation of high-pressure packer tests in fractured rocks[J]. **Engineering Geology**, 2015, 199: 91—106.
- [30] IZBASH S V, LELEEVA N M. Aspects of turbulent seepage flow in a fill[J]. **Power Technology and Engineering**, 1971, 5(5): 462—465.
- [31] YAMADA H, NAKAMURA F, WATANABE Y, et al. Measuring hydraulic permeability in a streambed using the packer test[J]. **Hydrological Processes**, 2005, 19(13): 2507—2524.