

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220610

# 岩石粗糙裂隙渗流试验模型研究

陈辉辉, 高悦, 郭凤娟, 王亚芹

(河北水利电力学院水利工程系, 河北 沧州 061001)

**摘要:** 分析岩石裂隙渗流对评价岩体工程安全性有重要意义。通过三维结构光学扫描仪扫描岩石裂隙表面测得三维坐标点并可视化重构, 采用节理粗糙度系数和形貌统计等参数定量描述岩石裂隙粗糙程度和起伏特征。试验研究发现, 当增大渗透压力梯度时, 岩石裂隙渗流将由线性渗流转变为非线性渗流, 采用 Forchheimer 公式能较好拟合这一过程。引入非线性因子  $E$ , 求得临界非线性流的阈值和雷诺数。引入动量相对损失量—欧拉数来描述裂隙渗流过程中的流体能量演化规律, 发现欧拉数呈先急速下降后逐渐趋于稳定的趋势。研究成果对实际工程具有一定指导意义。

**关键词:** 裂隙渗流; 三维形貌; 非线性流; 临界雷诺数; 欧拉数

**中图分类号:** TV139.1; TD313

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)01-0137-05

## 1 引言

随着煤炭等地下资源开采深度的延伸, 面临的科学问题和技术难题日益增多, 与深部岩体力学领域交叉融合不断深入。在富水区域中, 随着资源不断开挖, 会造成岩石周围赋存环境及力学特性变化, 逐渐发展形成微裂纹和裂隙通道, 会产生滑坡、坍塌等危害, 严重影响工程安全。目前, 关于在煤炭石油资源开发过程中岩石裂隙渗流的研究已较深入, 但关于裂隙粗糙形貌对岩石内部渗流的影响却较少提及。研究裂隙形貌和渗流关系, 可为不同地质条件工程预测渗流过程。针对高放核废料地质处置、深部地热开采、煤炭深部开采等岩体工程遇到的渗流问题<sup>[1]</sup>, 分析岩石裂隙渗流对评价岩体工程安全性有重要意义。为此, 本文在不同围压作用下, 开展花岗岩与变质板岩的岩石裂隙渗流试验, 得出渗透压力梯度与渗流流量的关系, 并根据三维光学扫描, 计算统计岩石裂隙粗糙度形貌参数特征, 探究不同种类岩石在三轴应力破坏后裂隙面的形貌特征, 并根据三维统计参数计算得到岩石裂隙渗流中雷诺数及欧拉数等演化规律, 深入分析岩石裂隙渗流机理, 以期工程实践提供参考。

## 2 试验仪器与操作规程

### 2.1 试验仪器

采用一体式“温度—应力—渗流耦合的岩石力学试验系统”进行试验研究。先进行岩石试样的三轴压缩破坏, 而后进行渗流研究。该试验系统由围压、轴压和渗透水压三套相互独立的加载部分组成, 具有以下功能和特点: ①特殊设计的渗透压力施加系统, 具有准确控制流量、压力大小的特点, 高围压(可达 100 MPa)和高轴压(可达 500 MPa)输出, 可实现应变和应力加载控制方式, 控制精度高, 其误差为  $\pm 0.1$  MPa, 满足高渗透压条件下稳态法渗流试验的要求; ②特殊设计的氟化橡胶套, 能保证将渗透水压力和围压完全隔开, 可实现渗透压力和围压的独立施加, 同时, 完全密封的油缸系统也可保证试验过程中渗透压力和围压的稳定性; ③在施压过程中会实时通过传感器采集数据。

### 2.2 标准试样的制备

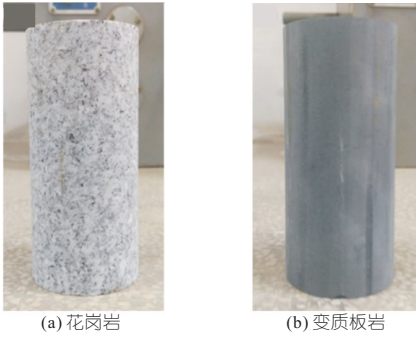
在工程现场选取岩性相对较好的花岗岩和变质板岩, 运回实验室中钻取加工, 制备成 50 mm × 100 mm (直径 × 高) 的圆柱形试样, 并将岩石上下表面及侧面打磨平滑, 制备得到图 1 的花

**收稿日期:** 2022-03-29, **修回日期:** 2022-05-20

**基金项目:** 河北省岩土工程安全与变形控制重点实验室、河北水利电力学院基本科研业务费项目(SYKY2014)

**作者简介:** 陈辉辉(1995-), 男, 助教, 研究方向为岩石裂隙渗流, E-mail: chenhnuc@163.com

**通讯作者:** 高悦(1987-), 女, 讲师, 研究方向为结构工程, E-mail: gaoyue@hbwe.edu.cn



(a) 花岗岩 (b) 变质板岩

图 1 花岗岩、变质板岩试样

Fig. 1 Granite sample and slate sample

花岗岩、变质板岩试样各三块。

### 2.3 试验操作规程

主要研究岩石在三轴应力过程作用下的力学特征并根据岩石破裂面粗糙度特征探索裂隙渗流的演变规律,具体操作规程为:①将制备好的岩石试样装配在多场耦合仪中进行密闭处理。②通过负压排出仪器密闭空腔中的空气并注入液压油,使腔中灌满液压油,再通过计算机系统中施加围压至 5 MPa,并保持围压恒定不变。在此基础上以 10 mL/min 的速率向岩石试样进行轴向加载,直至岩石发生三轴破坏,在加载轴力的过程中测量试样的弹性模量、泊松比、抗压强度、应力—应变曲线等。③通过计算机系统控制密闭腔体围压恒定,围压分别为 1、4、7、10 MPa。④保持围压恒定,破裂岩石通过入水口向其内部注射渗透压力,外部与大气相连,形成渗透压力梯度。⑤控制入水口的渗透压力,得到不同渗透压力梯度作用下,水体通过破碎岩石的水量。在相同时间间隔内,测得收集水量的重量,计算得流量。本次试验条件为室温,水的密度  $\rho$  和动态粘度  $\mu$  分别为  $0.997 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $0.891 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。⑥调节密闭腔体的围压,重复完成①~⑤,得到岩石在不同围压环境下的渗流情况。⑦最后将岩石试样破裂面进行三维结构光学扫描,得到岩石裂隙面的三维形貌参数。

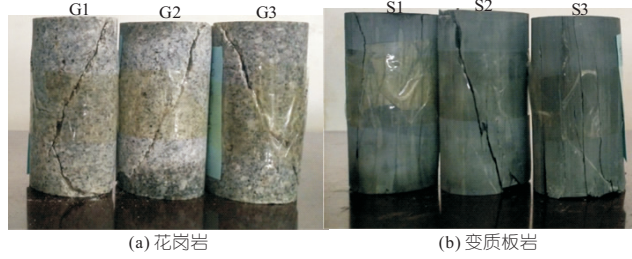
### 2.4 三维结构光学扫描仪

为获取岩石裂隙表面的几何形貌粗糙度,采用三维结构光学扫描仪测量裂隙形貌特征,为精确得到岩石裂隙面的起伏变化,本次扫描设置各个采样点之间的距离为 0.5 mm,并将试样稳固在转台上每  $30^\circ$  进行扫描,得到渗透压力作用后的岩石裂隙表面形貌粗糙度三维坐标点。

## 3 试验现象

### 3.1 三轴应力作用下的岩石裂隙形成

试样通过三轴应力变形破碎,在其内部形成渗流通道,花岗岩均形成一条裂隙, # 1、# 3 变质板岩分别形成两条裂隙(图 2)。



(a) 花岗岩 (b) 变质板岩

图 2 岩石三轴压缩过后宏观图

Fig. 2 Macro view of rock after triaxial compression

### 3.2 三维形貌粗糙度研究

对三维结构光学扫描仪获取的裂隙形貌坐标点进行计算机可视化处理,可得到裂隙表面效果图(图 3)。

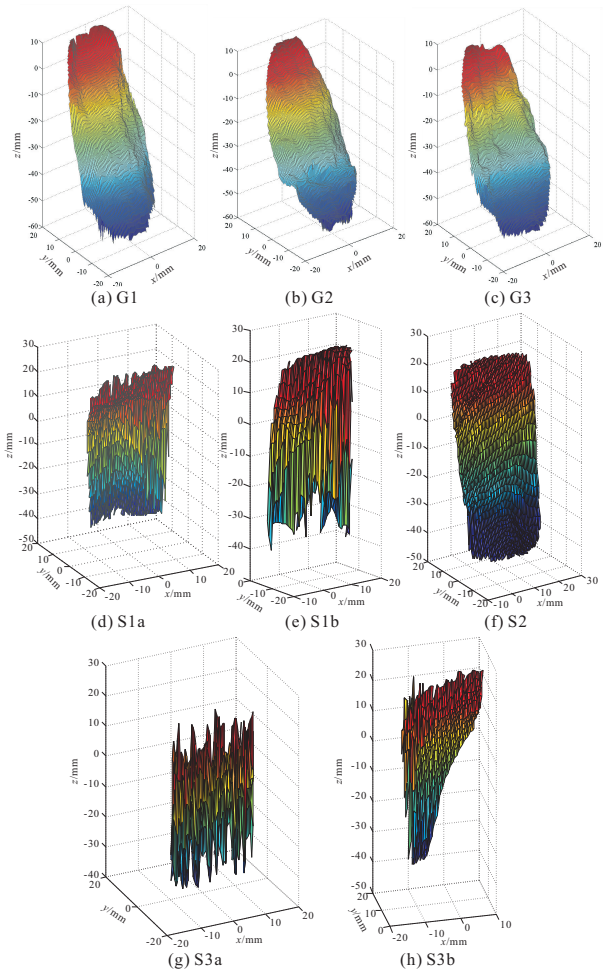


图 3 岩石裂隙形貌可视化图

Fig. 3 Visualization of rock fracture morphology

岩石裂隙粗糙度起伏变化的计算公式<sup>[2-4]</sup>为:

$$J_{JRC} = 61.79Z_2 - 3.47 \quad (1)$$

$$Z_a = R_{RMS} \left( \frac{\Delta x}{\Delta y} \right) = \left[ \frac{1}{n(\Delta x)} \sum_{i=1}^n (Z_{i+1} - Z_i)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$R_p = \max | Z_i - Z_a | \quad (3)$$

$$R_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - Z_a)^2} \quad (4)$$

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n | Z_i - Z_a | \quad (5)$$

$$e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} | Z_{i+1} - Z_i | \quad (6)$$

式中,  $J_{JRC}$  为粗糙度系数;  $Z_2$  为采样间距;  $Z_a$  为粗糙裂隙面高度的均值;  $R_{RMS}$  为均方根粗糙度;  $\Delta x$  为相邻采样点的间距;  $\Delta y$  为纵坐标值;  $n$  为采样点个数;  $Z_i$ 、 $Z_{i+1}$  为相邻采样点的起伏高度;  $R_p$  为峰值突起粗糙高度;  $R_a$  为平均粗糙度;  $e$  为裂隙面的开度大小。

计算并统计破裂岩石裂隙表面形貌粗糙度各参数, 结果见表 1。

表 1 岩石裂隙面的粗糙度参数

Tab. 1 Roughness parameters of rock fracture surface

试样编号	$J_{JRC}$	$R_p$ /mm	$R_{rms}$ /mm	$R_a$ /mm	$e$ /mm
G1	8.853	0.866 0	0.066 5	0.027	0.266
G2	8.208	0.535 6	0.042 1	0.019	0.259
G3	12.772	0.743 7	0.059 0	0.025	0.327
S1a	2.125	0.301 9	0.062 1	0.040	0.385
S1b	3.696	0.297 2	0.080 9	0.060	0.672
S2	2.533	0.284 5	0.083 4	0.034	0.394
S3a	5.677	0.369 3	0.093 0	0.073	0.750
S3b	5.342	0.328 7	0.092 7	0.068	0.634

国际岩石力学学会<sup>[5]</sup>将岩石裂隙面的粗糙程度区分为起伏粗糙度和基本粗糙度两部分。起伏粗糙度主要反映岩石在宏观程度上的起伏变化, 而基本粗糙度主要反映裂隙面的局部小尺度粗糙特征, 根据计算原理与方法,  $J_{JRC}$  表征岩石裂隙面整体粗糙程度, 即在宏观程度上反映主波面的起伏变化特征,  $R_p$  反映峰值突起粗糙高度, 表征岩石裂隙形貌的起伏变化极值,  $R_{rms}$ 、 $R_a$  反映岩石在微观程度上的小尺度粗糙特征, 即反映各参数点与平均高度的起伏变化关系。由表 1 可知, 花岗岩的  $J_{JRC}$  在 8~12 之间,  $R_p$  为 0.5 mm 以上, 均远大于变质板岩, 故花岗岩宏观起伏度较大; 而花岗岩的  $R_{rms}$ 、 $R_a$  均小于变质板岩的统计参数, 故花岗岩微观起伏度较小。由于岩石组成成分、成因的不同, 在岩石破坏时将会产生不同现象的岩石裂隙形貌粗糙度特征。

## 4 试验结果分析

### 4.1 渗流分析

使每个试样分别保持在围压为 1、4、7、10

MPa 工况下, 逐步改变渗透压力梯度  $\nabla P$ , 获得一系列渗流流量  $Q$ , 分别绘制岩石裂隙渗流关系曲线, 见图 4。由图 4 可知, 随着渗透压力梯度从

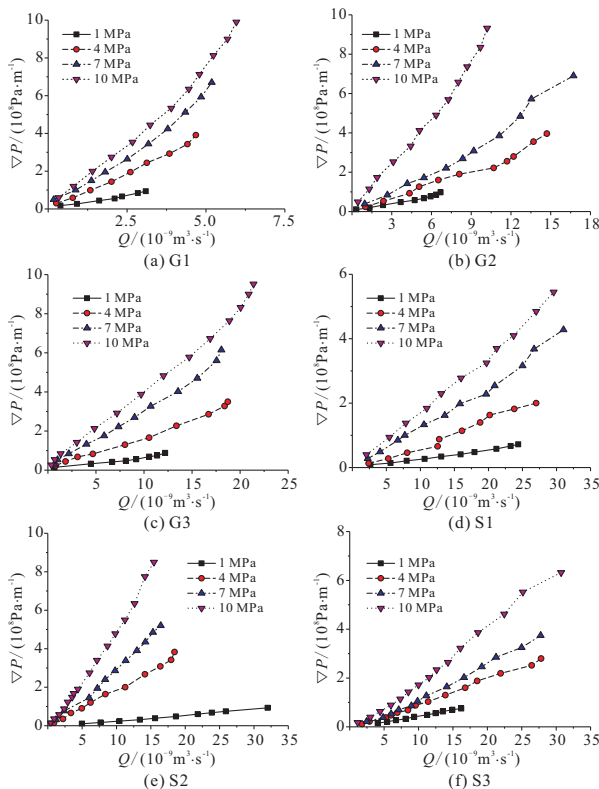


图 4 渗流流量与渗透压力梯度的关系曲线

Fig. 4 The relationship curve between seepage flow rate and osmotic pressure gradient

0 增到  $10^8$  Pa/m 级别, 花岗岩、变质板岩渗流量  $Q$  逐步从 0 递增到  $(10 \sim 20) \times 10^{-9}$ 、 $(20 \sim 30) \times 10^{-8}$   $m^3/s$ , 发现在同一量级下, 变质板岩的渗流量为花岗岩的 10 倍左右。分析表 1 可知, 花岗岩的起伏粗糙度更大, 流体通过其内部需克服的阻力做功越多, 故花岗岩试样的流量远低于变质板岩的流量。

裂隙渗流的计算公式<sup>[6]</sup>为:

$$\nabla P = aQ + bQ^2 \quad (7)$$

式中,  $a$ 、 $b$  均为拟合系数, 分别代表粘聚力项和惯性力项。

通过试验获取的数据, 并采用非线性渗流 Forchheimer 公式(式(7))进行拟合, 结果见表 2。分析可知, Forchheimer 公式对岩石裂隙渗流拟合度较好, 拟合系数均达到 0.95 以上。由表 2 可知, 在同一种类型岩石中, 随着围压从 1 MPa 逐渐增大到 10 MPa, 花岗岩粘聚力系数  $a$  和惯性力系数  $b$  分别扩大了约 10 倍, 而变质板岩增加较少。在粘聚力和惯性力变化中, 惯性力的变化更加明显, 岩石非线性渗流主要受惯性力的影响。

表 2 非线性渗流拟合结果

Tab. 2 Non-linear seepage fitting results

试样 标号	围压 /MPa	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	试样 标号	围压 /MPa	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
G1	1	25.561	133.22	0.980	S1	1	2.261 9	2.573 6	0.996
	4	68.131	268.82	0.996		4	5.613 6	8.137 2	0.980
	7	90.304	676.98	0.994		7	10.815 0	8.992 9	0.993
	10	110.74	843.13	0.996		10	16.060 0	6.832 2	0.997
G2	1	11.922	25.903	0.979	S2	1	0.206 4	0.028 8	0.997
	4	19.097	42.342	0.977		4	1.737 8	0.123 3	0.994
	7	25.495	99.248	0.992		7	2.417 2	0.466 1	0.997
	10	68.633	188.47	0.994		10	3.797 4	1.095 9	0.999
G3	1	5.6914	9.0122	0.952	S3	1	0.357 9	0.071 2	0.998
	4	15.645	12.227	0.991		4	0.840 7	0.058 6	0.995
	7	28.272	22.118	0.992		7	1.640 1	0.092 0	0.995
	10	37.607	22.642	0.995		10	1.695 4	0.163 9	0.993

注:表中*a*, *b* 单位分别为  $10^{17} \text{ kg/s m}^5$ 、 $10^{26} \text{ kg/m}^8$ 。

为研究非线性渗流特征,ZENG Z 等<sup>[7]</sup>引入非线性因子 *E* 来描述非线性渗流行为,其表达式为:

$$E = bQ^2 / (aQ + bQ^2) \quad (8)$$

根据工程经验,当  $E=0.1$  时,岩石裂隙渗流将由线性渗流转变为非线性渗流。根据式(8),分别计算得到两种不同岩石的非线性因子与渗流流量的关系曲线,见图 5。由图 5 可知,随着花岗岩、变质板岩渗流量逐步从 0 增加到  $(10 \sim 20) \times 10^{-9}$ 、 $(20 \sim 30) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ ,非线性因子 *E* 也不断从 0 增加到 0.3 左右,当  $E > 0.1$  时,表明裂隙渗流转变为非线性渗流,将不再适用于达西定律。

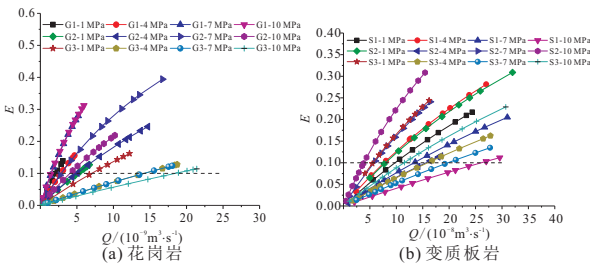


图 5 非线性因子 *E* 与渗流流量相关关系曲线

Fig. 5 Correlation curve of non-linear factor *E* and seepage flow

### 4.2 临界雷诺数

雷诺数表征裂隙流体自身的惯性力与分子间的粘性力的比值,其计算表达式为:

$$Re = \rho v e_1 / \mu = \rho Q / (\mu w) \quad (9)$$

式中, $\rho$  为流体密度; $v$  为流速; $e_1$  为渗流通道的开度; $\mu$  为动力粘滞系数; $w$  为渗流通道宽度。

当非线性渗流因子  $E=0.1$  时,裂隙渗流由线性渗流转变为非线性渗流的雷诺数称为临界雷诺数,由式(8)化简可得:

$$Q = a / (9b) \quad (10)$$

据此计算得到临界雷诺数  $Re_c$  为:

$$Re_c = a\rho / (9b\mu w) \quad (11)$$

根据式(9)~(11)及试验获得的数据,可得渗流压力梯度与(临界)雷诺数关系曲线,见图 6。图 6 中,“○”表征临界雷诺数,随着渗透压力梯度的不断增大,雷诺数也表现为一直增大,当非线性因子  $E=0.1$  时,可计算得出临界雷诺数,此时岩石裂隙渗流恰好发生非线性渗流。分析图 6 可发现,花岗岩裂隙表面形貌粗糙起伏度越大,计算的岩石临界雷诺数越小,在不同工况下,花岗岩、变质板岩的临界雷诺数分别在  $0.1 \sim 0.3$ 、 $2 \sim 6$  之间,表明花岗岩裂隙渗流更易产生非线性变化。

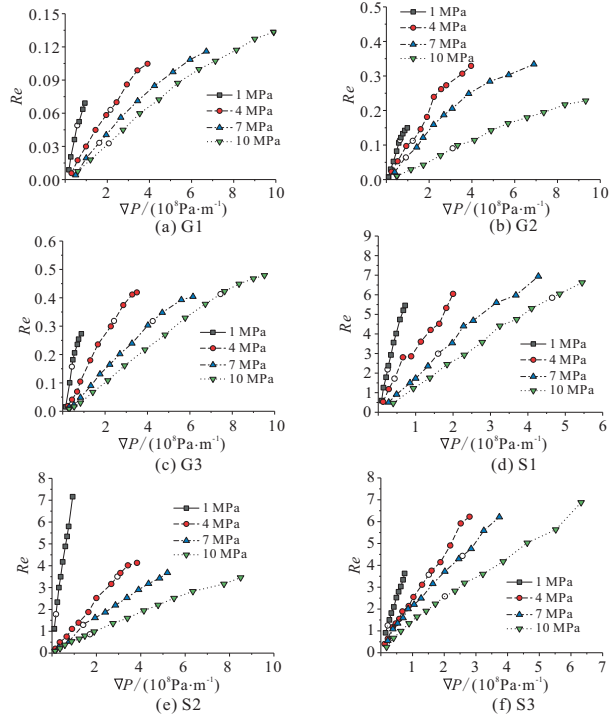


图 6 渗透压力梯度与(临界)雷诺数关系

Fig. 6 Relationship between osmotic pressure gradient and (critical) Reynolds number

### 4.3 渗流能量损失

在工程中,欧拉数表征流体在流动过程动量传递的大小。其计算公式为:

$$E_u = \nabla P / (\rho v^2) \quad (12)$$

计算得出动量损失率欧拉数与渗透压力梯度的关系曲线,见图 7。

随着渗透压力梯度从 0 增大到  $2 \times 10^8 \text{ Pa/m}$ ,花岗岩欧拉数瞬间从  $10^{14}$  量级减少至  $10^8$  量级,当渗透压力梯度增到  $10 \times 10^8 \text{ Pa/m}$ ,欧拉数一直保持在  $10^8$  量级;渗透压力梯度从 0 增到  $2 \times 10^8 \text{ Pa/m}$ ,变质板岩欧拉数瞬间从  $10^{12}$  量级减少至  $10^7$  量级,当渗透压力梯度增到  $8 \times 10^8 \text{ Pa/m}$ ,欧拉数一直保持在  $10^7$  量级。花岗岩裂隙宏观程度上的起伏粗糙度大于变质板岩宏观程度上的起伏粗糙度,当裂隙发生渗流时,流体损失自身动量较多,表明渗流在花岗岩中的发展相对较难。

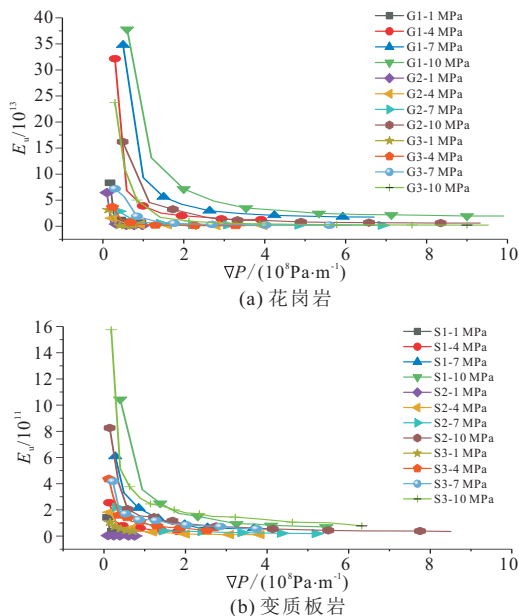


图 7 欧拉数与渗透压力梯度的关系曲线  
Fig. 7 The relationship between Euler number and osmotic pressure gradient

## 5 结论

a. 通过三维结构光学扫描仪获取岩石裂隙表面形貌三维坐标,并对坐标点进行可视化处理,定量计算破裂岩石裂隙表面形貌统计参数。

b. Forchheimer 公式能很好地描述岩石裂隙渗流现象,拟合系数均达到 0.95 以上。随着围压逐渐增大,在粘聚力和惯性力变化中,惯性力的变化更加明显,岩石非线性渗流主要依据惯性力的影响。

c. 当岩样受到的渗透压力梯度不断增大时,雷诺数也随之增大,当非线性因子  $E$  等于 0.1 时,表明裂隙渗流恰好发生非线性渗流。对于不

同岩样,花岗岩裂隙表面形貌粗糙起伏度越大,计算得出的岩石的临界雷诺数越小,表明花岗岩裂隙渗流更易产生非线性变化。

d. 花岗岩裂隙宏观程度上的起伏粗糙度大于变质板岩宏观程度上的起伏粗糙度,当裂隙发生渗流时,流体损失自身动量较多,表明渗流在花岗岩中的发展相对较难。

## 参考文献:

- [1] 陈辉辉,张小波,姚池,等. 高温作用后岩石裂隙渗流试验及其模型分析[J]. 煤炭学报,2019,44(9): 2760-2766.
- [2] BARTON N, Review of a new shear-strength criterion for rock joints [J]. Engineering geology,1973, 7(4):287-332.
- [3] BOUTT D F, GRASSELLI G, FREDRICH J T, et al. Trapping zones: The effect of fracture roughness on the directional anisotropy of fluid flow and colloid transport in a single fracture [J]. Geophysical research letters, 2006, 33(21):1522-1534.
- [4] YU X, VAYSSADE B. Joint profiles and their roughness parameters [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts,1991,28(4):333-336.
- [5] SINGH K K, SINGH D N, RANJITH P G. Laboratory simulation of flow through single fractured granite [J]. Rock mech. rock eng.,2015,48(3): 987-1000.
- [6] FORCHHEIMER P. Wasserbewegung durch boden [J]. Z. ver. deutsch. ing.,1901,45:1782-1788.
- [7] ZENG Z, GRIGG R. A criterion for non-darcy flow in porous media [J]. Transport in porous media, 2006,63(1):57-69.

## Research on Seepage Test Model of Rough Rock Fracture

CHEN Hui-hui,GAO Yue, GUO Feng-juan, WANG Ya-qin

(Department of Hydraulic Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, China)

**Abstract:** Analysis of rock fracture seepage plays an important role in evaluation of rock engineering safety. The three-dimensional coordinate points of the rock fracture surface were scanned by a three-dimensional structure optical scanner and visually reconstructed. Parameters such as joint roughness coefficient JRC and topography statistics were used to quantitatively describe the roughness and undulation characteristics of rock fractures. Through experimental research, it is found that when the seepage pressure gradient increases, the seepage in rock fractures will change from linear seepage to non-linear seepage, and the Forchheimer formula can better fit this process. The threshold and Reynolds number of the critical Darcy flow were obtained by introducing the nonlinear factor  $E$ . The relative loss of momentum-Euler number was introduced to study the law of fluid energy evolution in the process of fracture seepage. It is found that the Euler number shows a trend that first drops rapidly and then gradually stabilizes. The result has certain guiding significance for actual engineering.

**Key words:** fissure seepage; three-dimensional topography; non-Darcy flow; critical Reynolds number; Euler number