DOI：10.16285/j.rsm.2022.1524

循环剪切作用下三维粗糙裂隙非线性渗流特性数值模拟研究

蔚立元，杨瀚清，王晓琳，刘日成，王鉴森

（中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室，江苏 徐州 221116）

摘 要：研究了循环剪切过程中剪切位移和循环次数对三维粗糙裂隙非线性水力特性的影响。首先，基于天然粗糙裂隙面的高程数据生成三维裂隙面，并通过前人的研究结果确定循环剪切过程中的法向位移变化值，建立了 16 个开度空间模型，从而得到了不同剪切位移和循环次数下接触面积和开度分布情况，发现当循环次数一定时，随着剪切位移的增加，原本吻合的上下表面发生错动，平均开度和各向异性增大，接触面积减小；剪切位移一定时，随着循环次数的增加，上下表面起伏在剪应力作用下被磨平，接触面积增大，平均开度减小。将模型导入数值模拟软件进行计算得到流量数据，结果表明，水力梯度随流量变化规律符合 Forchheimer 定律。循环 1 次时，随着剪切位移从 4 mm 增加到 10 mm，线性 Fochheimer 系数减小了 88.3%，非线性 Fochheimer 系数减小了 95.2%；循环 2 次时，随着剪切位移从 4 mm 增加到 10 mm，线性 Fochheimer 系数减小了 95.4%，非线性 Fochheimer 系数减小了 99.7%，两系数减小的幅度随循环次数增大而增大。进一步分析发现，剪切位移的增加对裂隙渗透性有促进作用，循环次数增加对渗透性起抑制作用。此外，归一化渗透系数随雷诺数变化规律与 Zimmerman 等提出的预测公式相吻合，且本研究数值模拟计算结果与其公式的拟合系数趋近 1，公式中的 Fochheimer 系数β随剪切位移增大而减小，随循环次数增大而增大。

关 键 词：循环剪切；剪切渗流；雷诺数；归一化渗透系数

中图分类号：TU411 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2023) 09－2757－10

Numerical study on nonlinear hydraulic properties of three-dimensional rough joints under cyclic shear conditions

YU Li-yuan, YANG Han-qing, WANG Xiao-lin, LIU Ri-cheng, WANG Ying-sen

(State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: In this study, the effects of shear displacement and the number of cycles on the nonlinear hydraulic characteristics of three-dimensional rough fracture during cyclic shear are numerically studied. First, a three-dimensional fracture surface is generated based on the elevation data of the natural rough fracture surface, and the normal displacement during the process of cyclic shear is determined through previous studies. Sixteen fracture aperture fields are established so as to obtain the contact area and aperture distribution under different shear displacements and cycles times. It is found that when the number of cycles is constant, the upper and lower surfaces of the original mesh will stagger with the increase of shear displacement, the average mechanical aperture and anisotropy increase, and the contact area decreases; when the shear displacement is constant, with the increase of the number of cycles, the upper and lower surface undulations are smoothed under the action of shear stress, the contact area increases, and the average mechanical aperture decreases. Finally, the model is imported into the numerical simulation software to calculate the flow rate data. The results show that the variation of hydraulic gradient with flow rate conforms to Forchheimer's law. The linear Fochheimer coefficient decreases by 88.3% and the nonlinear Fochheimer coefficient decreases by 95.2% as the shear displacement increases from 4 mm to 10 mm under 1 cycle; the linear Fochheimer coefficient decreases by 95.4%, the nonlinear Fochheimer

收稿日期：2022-10-02 录用日期：2023-02-17

基金项目：国家自然科学基金项目（No.51979272，No.52179118）；江苏省自然科学基金项目（No.BK20211584）；江苏省科技厅科技项目–碳达峰碳中和科技创新专项资金项目（No.BK20220025）。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51979272, 52179118), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (BK20211584) and the Science and Technology Project of Jiangsu Provincial Department of Science and Technology-Carbon Emissions Peak and Carbon Neutrality Science and Technology Innovation Special Fund Project (BK20220025).

第一作者简介：蔚立元，男，1982 年生，博士，研究员，主要从事岩石力学与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: yuliyuan@cumt.edu.cn

通讯作者：王晓琳，女，1997 年生，博士研究生，主要从事单裂隙岩体剪切渗流与传热方面的研究工作。E-mail: wangxiaolin@cumt.edu.cn

coefficient decreases by 99.7% as the shear displacement increases from 4 mm to 10 mm under 2 cycles, and the reduction range of the two coefficients increases with the increase of the number of cycles. Further analysis shows that the increase of shear displacement boosts the fracture permeability, while the increase in number of cycles inhibits the permeability. In addition, the variation of normalized transmissivity coefficient with Reynolds number conforms to the research results of Zimmerman et al., and the numerical simulation results of this study are fitted with the normalized transmissivity coefficient prediction formula proposed by Zimmerman et al. The fitting coefficient approaches to 1, where Fochheimer coefficient β decreases with the increase of shear displacement and increases with the increase of cycle times.

Keywords: cyclic shear; shear fluid flow; Reynolds number; normalized transmissivity coefficient

1 引 言

在增强型地热系统（enhanced geothermal system，简称 EGS）地热能开采过程中，水力剪切增透是主要技术手段之一[1]。水力剪切增透的作用原理是通过剪切滑移使裂隙实现自支撑，从而增大地热岩层的渗透性。其中循环剪切次数和剪切位移对裂隙渗透性有重要影响。

在地震荷载或煤层工作面回采等影响下，岩体会沿着节理面产生循环剪切行为，国内外部分学者也开展了相关研究。刘日成等[2]通过开展恒定法向刚度边界条件下三维粗糙节理面循环剪切试验，发现剪切应力−剪切位移路径具有典型的刚度依赖特征；Belem 等[3]研究了循环剪切作用下岩石节理表面的损伤行为，提出了预测节理表明粗糙度退化的经验公式；Mirzaghorbanali 等[4-5]探讨了剪切速率、充填厚度和循环次数对岩石节理力学特性的影响，建立了循环剪切作用下充填节理剪切强度数学评价模型；Han 等[6]开展了充填节理在循环剪切作用下的力学特性试验研究，提出了考虑初始法向应力、法向刚度、剪切速率、剪切位移、循环次数的剪切应力、法向应力和法向位移经验预测公式。上述研究结果表明，循环剪切会影响裂隙粗糙度、裂隙开度和上下表面接触面积，进而影响裂隙岩体内流体的流动特性。

许多学者对裂隙岩体剪切渗流过程进行了研究。夏才初等[7]进行了 3 种不同渗透水压力条件下的剪切−渗流试验，发现剪切过程中流量、等效水力开度和透射率均呈现类似于节理剪胀的三阶段变化规律，即快速增长阶段、增速变缓阶段和稳定阶段；张文泉等[8]通过模拟开采过程中采场的水平应力、垂向应力和水头压力进行压剪−渗流耦合试验，探讨了在恒定法向荷载 CNL 和恒定法向刚度 CNS 条件下，剪切位移和裂隙粗糙度对渗流特性的影响。Huang 等[9]建立了 4 个三维自仿射粗糙裂隙模型，探明了粗糙度、剪切位移和渗流方向对流动特性和渗透性的影响，并提了出三维单裂隙渗透系数的预测公式。Yin 等[10]基于真实裂隙网络，进行了不同交叉数的应力依赖性流体流动试验，探明了交叉点数和加载条件对非线性流动和渗透性的影响。蒋宇静等[11]进行了恒定法向荷载和恒定法向刚度条件下的剪切渗流试验，探明了剪切位移和受力状态对裂隙开度和渗透性的影响。但上述研究没有考虑到循环和剪切渗流的综合作用。

在地热能开采过程中，温度变化和流体压力会对岩体产生细微扰动，导致应力重分布，使围岩节理裂隙发育和水力剪切形成的剪切滑移面产生微小位移。因此，在流体循环传热过程中可能会产生微裂隙循环剪切，影响裂隙岩体渗透率，从而对地热能开采效率产生一定影响[12]。本研究建立了 16 个三维粗糙单裂隙开度空间模型，探究了不同剪切位移和循环剪切次数下接触面积和开度空间分布规律，并通过求解 Navier-Stokes 方程进行数值模拟计算，得到水力梯度随体积流量变化规律，确定了界定流体线性流动与非线性流动的临界体积流量值，并进一步对渗透系数进行计算，得到归一化渗透率随雷诺数变化趋势，最终得到了 Forchheimer 系数随剪切位移和循环次数变化的规律。

2 试验方法

2.1 理论背景

前人对裂隙面粗糙程度的表征已开展了许多研究[13-15]。目前公认的是国际岩石力学与工程学会建议方法[16]，将三维裂隙表面沿 x 方向等距截取二维粗糙裂隙曲线，每条二维曲线的粗糙程度可用节理粗糙度系数 JRC 表征[17]，三维裂隙面的粗糙程度可用所有二维曲线 JRC 的平均值表征。JRC 由下式计算[18-19]：

$$\mathrm{JRC}=32.2+32.47\lg Z_2 \tag{1}$$

$$Z_2=\left[\frac{1}{M}\Sigma\left(\frac{z_{i-1}-z_i}{y_{i-1}-y_i}\right)^2\right]^{1/2} \tag{2}$$

式中：Z_2 为二维曲线起伏高度一阶差值的均方根，

无量纲；y_i 和 z_i 为二维裂隙剖面两个方向上第 i 个点的坐标；M 为沿着 y 方向的测点数。

水作为黏性不可压缩牛顿流体，其流动状态由 Navier-Stokes 方程（简称 N-S 方程）控制。其张量形式如下[20-22]：

$$\rho[\partial \boldsymbol{u}/\partial t+(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u}]=-\nabla \boldsymbol{p}+\nabla\cdot\boldsymbol{T}+\rho \boldsymbol{f} \tag{3}$$

式中：ρ 为密度；$\boldsymbol{u}$ 为流速矢量；∇ 为哈密顿算子，无量纲；$-\nabla \boldsymbol{p}$ 为水压力张量；$\boldsymbol{T}$ 为剪应力张量；$\boldsymbol{f}$ 为体积力张量。N-S 方程适用广泛，裂隙几何特征及流体惯性力变化的影响皆考虑在内，既适用于线性流动，也适用于非线性流动；但直接求解 N-S 方程工作量非常大，并且需要耗费大量的时间和经济成本，因此往往将裂隙简化为光滑的平行平板模型。假定裂隙内流体流动为达西流，流速很小，且忽略由交叉点和粗糙表面引起的惯性效应，有

$$(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u}=0 \tag{4}$$

此时可由如下立方定律（cubic law）来计算裂隙内流体流动：

$$Q=-\frac{we_{\mathrm{h}}^3}{12\mu}\Delta P \tag{5}$$

式中：Q 为体积流速；w 为裂隙宽度；e_{h} 为水力开度；ΔP 为进出口压力差。

随着流体流速增大，流速和压力梯度不再线性相关，立方定律将不再适用。因此，Forchheimer 等提出了经验方程来表示流体流动的非线性状态，即 Forchheimer 方程，其表达式如下[23]：

$$-\Delta P=a'Q+b'Q^2 \tag{6}$$

式中：a'、b'分别为 Forchheimer 方程线性系数和非线性系数（惯性系数）；$a'Q$ 和 $b'Q^2$ 分别为流体流动的线性项与非线性项，与裂隙的等效水力开度、几何形状和表面粗糙程度相关。采用水力梯度 J 描述裂隙内流体的流动状态，其计算公式如下[24]：

$$J=\frac{\Delta P}{\rho g} \tag{7}$$

式中：g 为重力加速度，取 10 m/s^2。J 与 ΔP 呈线性关系，故 J 与 Q 也服从 Forchheimer 方程，有

$$-J=aQ+bQ^2 \tag{8}$$

式中：a、b 分别为线性系数和非线性系数，且 $a=a'/(\rho g)$，$b=b'/(\rho g)$。

Zeng 等[25]通过大量室内试验与理论推导，提出了比例系数来表征裂隙岩体内流体的流动状态：

$$E=\frac{bQ^2}{aQ+bQ^2} \tag{9}$$

式中：E 为非线性渗流引起的水压占总水压的比值，是大小在 0～1 范围内的无量纲系数。在研究裂隙岩体非线性渗流特性时，Zimmerman 等[26]采用 $E=0.1$ 作为临界值来界定裂隙岩体内流体流动的线性与非线性。通常用雷诺数 Re 来量化非线性流动的开始，其表达式如下[21, 27]：

$$Re=\frac{\rho Q}{\mu w} \tag{10}$$

式中：w 为裂隙宽度。

渗透系数 T 是表征岩体裂隙或者裂隙网络渗透性的常用系数[28]，按下式计算：

$$T=-\frac{\mu}{\Delta P w}Q \tag{11}$$

为了更直观获得渗透性变化规律，通常对 T 进行归一化处理得到归一化渗透系数 T/T_0，为无量纲的渗透系数表达式，其中 T_0 为 $Re=0$ 时的渗透系数，因为此时流体流动速度非常低，惯性力可以忽略不计。Zimmerman 等[26]通过开展天然砂岩粗糙裂隙的数值模拟和渗流试验，确定了 T/T_0 随 Re 变化的关系式：

$$\frac{T}{T_0}=\frac{1}{1+\beta Re} \tag{12}$$

式中：β 为 Forchheimer 系数。

2.2　三维单裂隙开度空间模型

刘日成等[2]通过现场取样并加工成投影面积 100 mm×200 mm 的标准试样，采用高精度非接触式三维激光扫描仪获得了表征裂隙表面三维粗糙形貌的数据。本研究利用其获得的数据进行数字化重构，结果如图 1 所示。

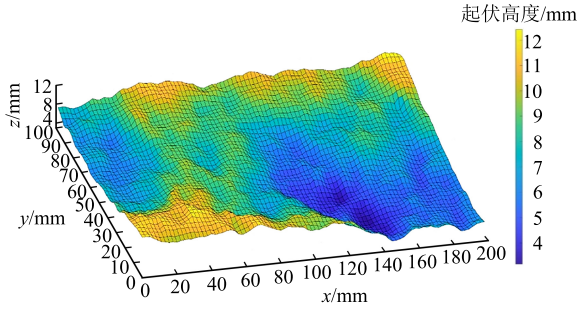


图 1　三维粗糙裂隙表面

Fig.1　3D rough fracture surface

参考以往学者研究经验[2, 13, 29]，在三维粗糙节理表面沿着 y 方向每隔 2 mm 等间距提取出 50 条二维曲线，沿着 x 方向每隔距 1 mm 提取坐标点，并根据式（1）、（2）计算每条二维曲线的 JRC 值，最终求得本研究三维曲面 JRC 为 7.36。开展了三维粗糙节理面循环剪切试验[2]，节理面初始法向刚度为 0.49 MPa/mm，初始切向刚度为 13.5 MPa/mm，基质材料的密度为 2.066 g/cm^3，单轴抗压强度为 50 MPa。确定了循环剪切过程中，法向应力σ_n恒定为 2 MPa，剪切位移 u 为 4～10 mm 和循环剪切次数 n 为 1～10 次时，对应的花岗岩法向位移δ_h，列于表 1，其中 e_m 为力学开度，即裂隙上下表面之间距离的平均值。

表 1 法向位移与平均开度值

Table 1 Normal displacement and average mechanical aperture

u/mm	n/次	δ_h/mm	e_m/mm
4	1	0.833	0.81
4	2	0.616	0.59
4	5	0.431	0.40
4	10	0.350	0.32
6	1	1.110	1.08
6	2	0.890	0.87
6	5	0.690	0.66
6	10	0.570	0.55
8	1	1.370	1.35
8	2	1.170	1.15
8	5	0.960	0.94
8	10	0.840	0.82
10	1	1.580	1.57
10	2	1.420	1.40
10	5	1.230	1.22
10	10	1.130	1.12

将图 1 所示粗糙裂隙面向右平移距离 u，向上平移距离δ_h，将平移后的上表面 z 坐标减去平移前下表面的 z 坐标，数值为正的即对应测点开度值，数值为 0 或负数的代表接触，并以此建立三维单裂隙开度空间模型，如图 2 所示。本研究选取的裂隙长度 l×宽度 w 为 188.7 mm×99.9 mm，黄色区域表示流体流动的开度空间，内部空白表示裂隙上下表面接触的部分，无流体流过，流体由左边界入口流入，从右边界出口流出，四周均为不透水壁面。

2.3 数值模拟计算过程

首先，将如图 2 所示的 CAD 模型以 stl 格式输出，然后导入 ANSYS 中的 ICEMCFD 软件中进行网格划分。选择最大网格尺寸为 0.5 mm，此时网格质量既满足计算精度要求，也可将后续计算控制在合理的时间范围内，同时节约经济成本。将划分好网格的模型输出为 mesh 文件，导入 FLUENT 流体流动数值模拟软件进行流量计算。模型内流体设置为室温（20 ℃）条件下的水，密度为 998.2 kg/m^3，动态黏度为 0.001 Pa·s。左侧入口施加 10^{-3}、10^{-2}、10^{-1}、10^{0}、10^{1}、10^{2}、10^{3} Pa 共 7 个梯度的入口压力 P_1，右侧出口压力 P_2 设置为 0。随着压力梯度由小到大，裂隙内流体流动也由线性流变为非线性流。求解模型选择层流模型，假定裂隙上下表面为不透水壁面。设置好各参数后通过求解 Navier-Stokes 方程对流体流动状态进行模拟，此程序代码广泛应用于前人的研究中，其可靠性已经被充分验证[30-31]。最后，输出各模型不同进出口压力条件下的流量数据和经过后处理的流线图，完成数值模拟计算。

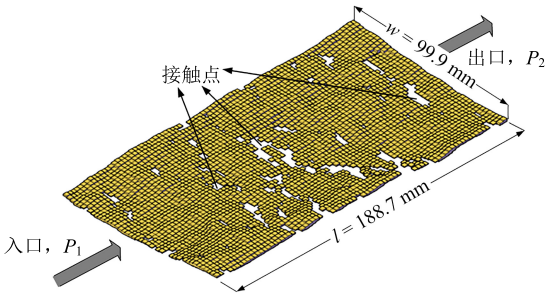


图 2 三维开度空间示意图

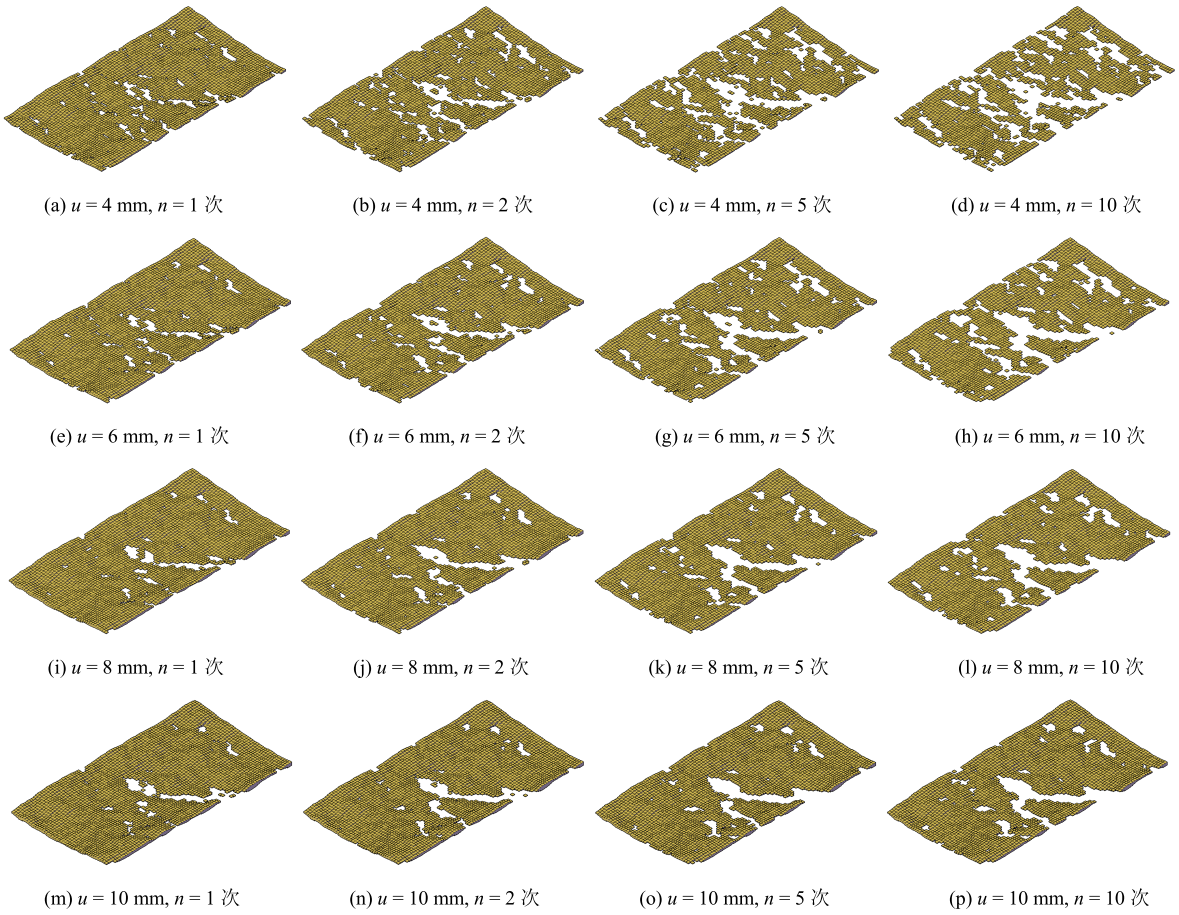
Fig.2 Schematic diagram of 3D aperture field

3 结果分析

3.1 开度分布情况

共建立 16 个开度空间模型如图 3 所示。可以看出，当 u 一定时，随着 n 增加，在剪应力的作用下裂隙表面起伏被磨平，接触面积增大，流体流动的区域减小；当 n 一定时，u 越大，原本啮合的上下表面错动程度越高，流体流动区域越大。当 u = 4 mm，循环 5 次和 10 次以及 u=6 mm，循环 10 次时，如图 3(c)、3(d)和 3(h)所示，上下表面接触点大面积分布在开度空间内，流体流动区域沿 x 方向没有连通的渗流通道，因此上述模型内无流体流动。

循环剪切过程中每个模型的开度分布如图 3(q)、3(r)、3(s)和 3(t)所示，u 为负值时表示上下表面接触，在流体流动计算过程中负值用 0 替换。不同 u 和 n 下的开度服从高斯分布，循环剪切过程中开度的均值μ（即力学开度 e_m）和方差σ变化规律如图 4 所示，μ（或 e_m）随 n 的增大而减小，随 u 的增大而增大，σ随 n 的增大无明显变化，但随 u

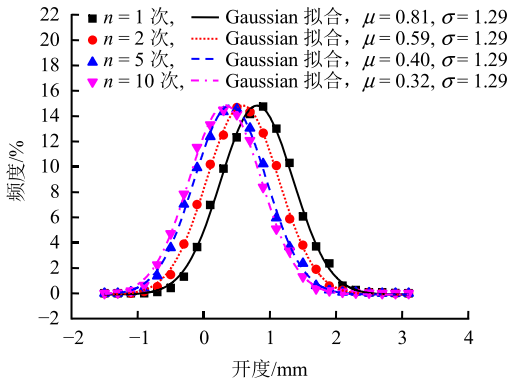


(a) u = 4 mm, n = 1 次　(b) u = 4 mm, n = 2 次　(c) u = 4 mm, n = 5 次　(d) u = 4 mm, n = 10 次

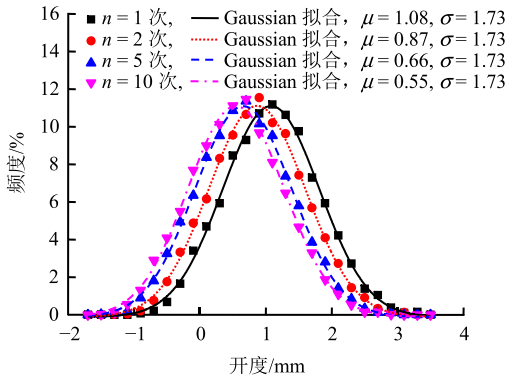
(e) u = 6 mm, n = 1 次　(f) u = 6 mm, n = 2 次　(g) u = 6 mm, n = 5 次　(h) u = 6 mm, n = 10 次

(i) u = 8 mm, n = 1 次　(j) u = 8 mm, n = 2 次　(k) u = 8 mm, n = 5 次　(l) u = 8 mm, n = 10 次

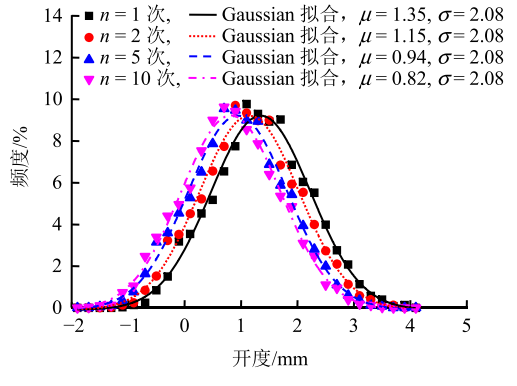
(m) u = 10 mm, n = 1 次　(n) u = 10 mm, n = 2 次　(o) u = 10 mm, n = 5 次　(p) u = 10 mm, n = 10 次



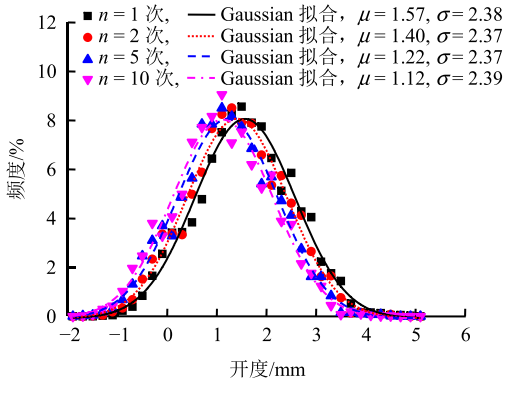
(q) u = 4 mm



(r) u = 6 mm



(s) u = 8 mm



(t) u = 10 mm

图 3　循环剪切后接触面积与开度分布情况

Fig.3　Contact distributions and aperture distributions of fractures during the cyclic shear process

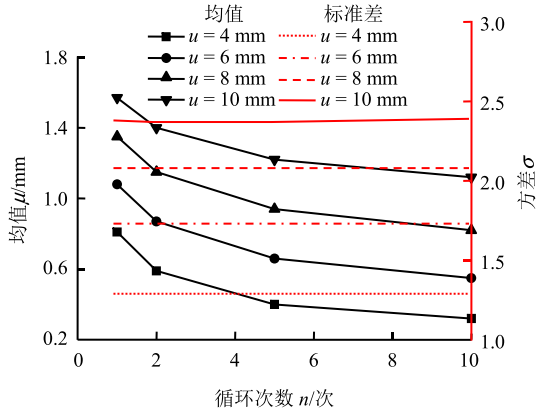


图 4 循环剪切过程中开度分布的均值和方差变化

Fig.4 Variations of μ and σ of the mechanical aperture

的增大而线性增加。σ能反映一个数据集的离散程度，故裂隙开度分布的各向异性（或不均匀性）随 u 的增加而增大。

3.2 流体流动特性

图 5 给出了 $P_1 = 10^3$ Pa 时裂隙内流体的流线分布特征随 u 和 n 变化情况，根据式（7）可计算出此时 J = 0.53，流体流动呈明显的非线性，具有沟槽流的特征，这是由上下表面接触面积及裂隙开度空间的变化引起的。可以看出流动区域的面积随 n 增大而减小，随 u 增大而增大，u = 4 mm，循环 5、10 次和 u = 6、循环 10 次时，裂隙内无流体通过。当 u 较小时，如 4 mm，流线较为曲折，且流线密度很小；当 u 较大时，如 10 mm，流线较为平缓且密集，流线密度随着 n 增大而减小。

J 随 Q 变化的规律如图 6 所示。通过 Forchheimer 方程对 J-Q 关系曲线进行零截距回归拟合。结果表明，不同 u 和 n 下数值计算结果与 Forchheimer 理论方程吻合，且所有工况下拟合相关系数均大于 0.99。J 随 Q 的增加而增加，表现出明显的非线性。随着 n 增大，流体流动的非线性愈发明显。当 Q 一定时，J 随着 u 增大而减小，随着 n 增大而增大。这是因为 u 增大时开度空间增大，流体流过所需的压力减小；当 n 增大时，裂隙表面起伏被磨平，开度空间减小，流体流动所需的压力增加。

a 和 b 的变化规律如图 7 所示。b 比 a 总体大近 5 个数量级，与前人研究结果一致[15]。a 和 b 都

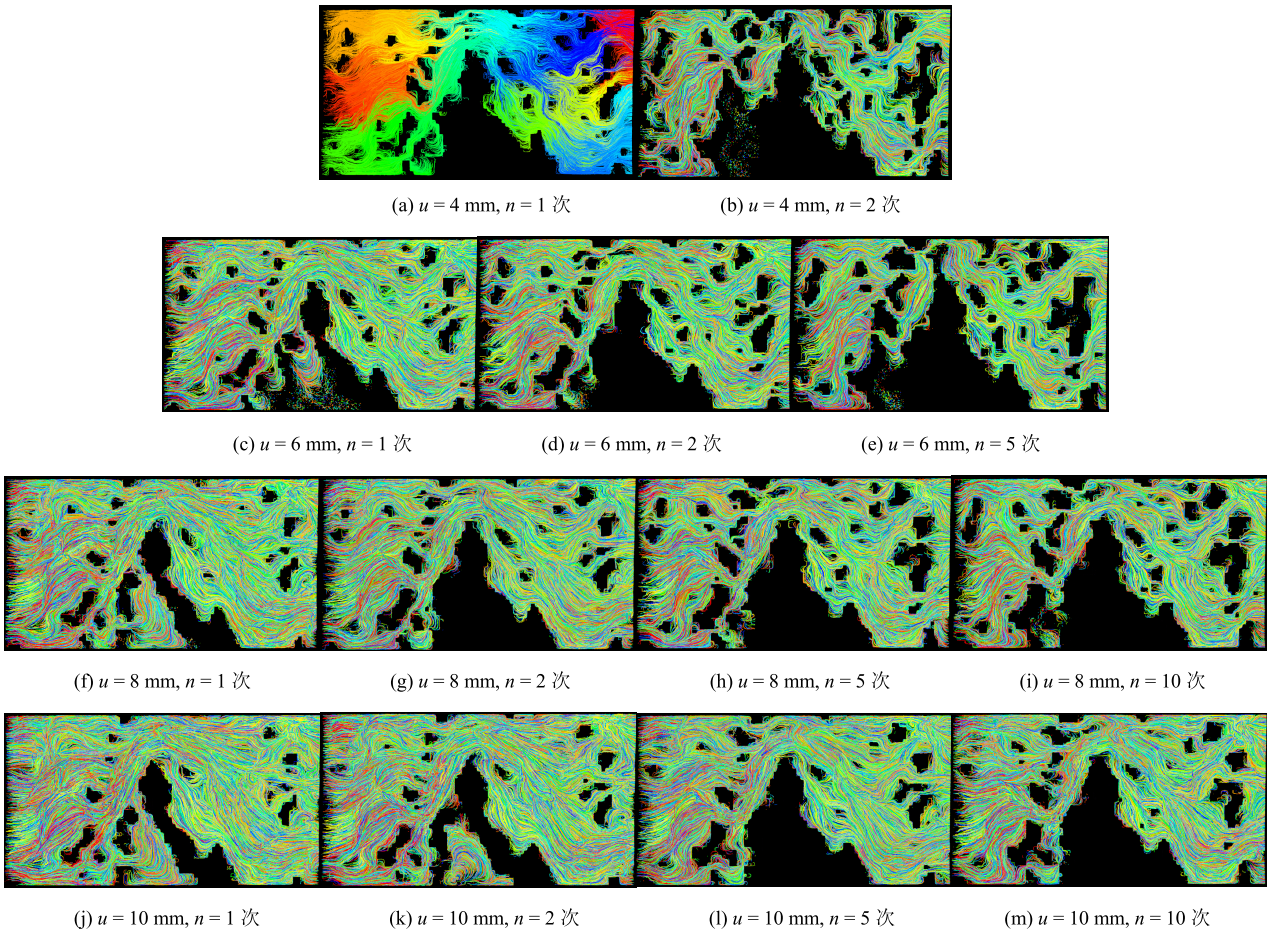
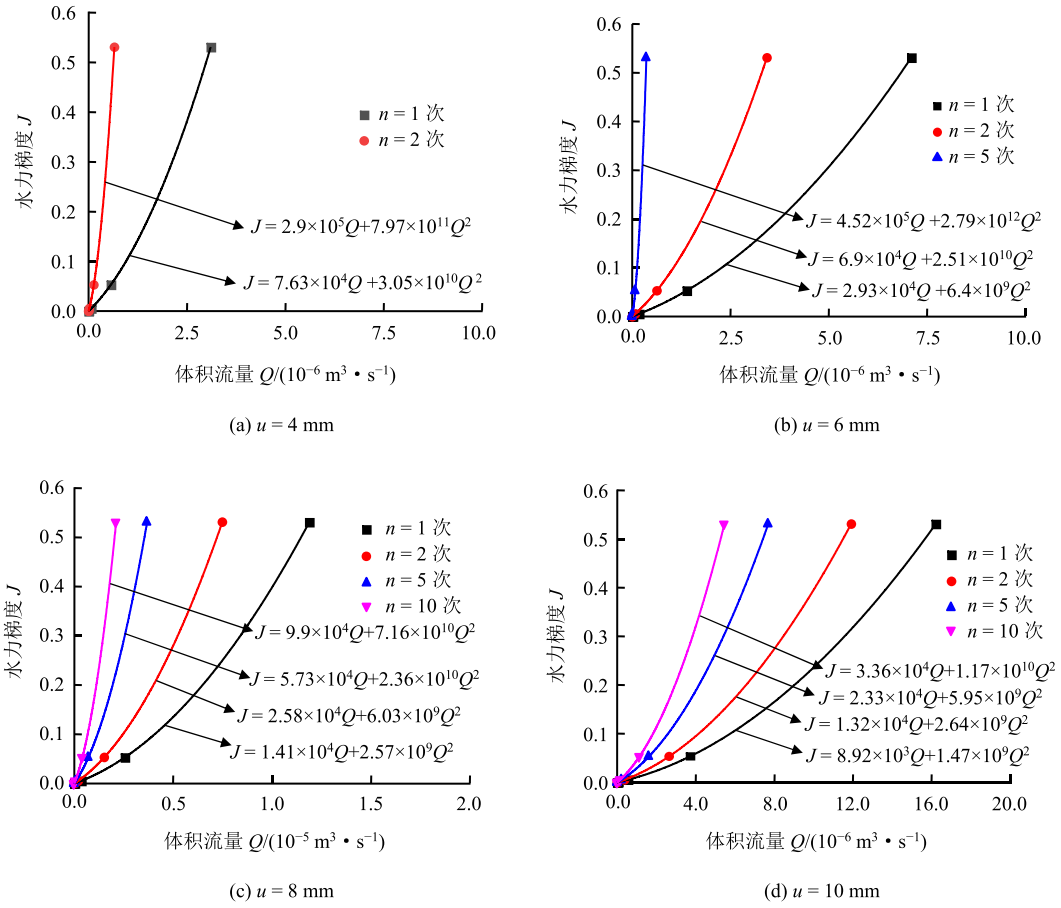


图 5 不同剪切位移和循环次数下的流线图

Fig.5 Flow streamlines for different shear displacements and number of cycles during the cyclic shear process

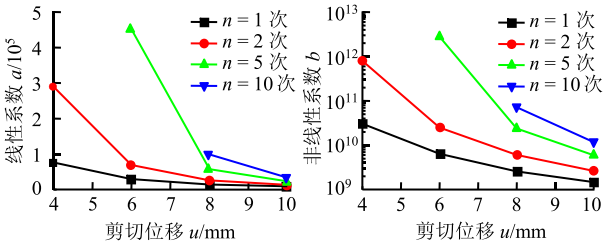


(a) u = 4 mm　　(b) u = 6 mm

(c) u = 8 mm　　(d) u = 10 mm

图 6　循环剪切过程中水力梯度随体积流量变化关系

Fig.6　Relationships between the hydraulic gradient and volumetric flow rate during the cyclic shear process



(a) a 随 u 变化　　(b) b 随 u 变化

图 7　线性系数 *a* 和非线性系数 *b* 变化规律

Fig.7　Variations in the linear coefficient *a* and nonlinear coefficient *b*

随 u 的增大而减小，说明 u 增大会使流体内部压力减小。当 u 较小时，a 和 b 随 u 呈指数减小趋势，随着 u 增大，a 和 b 变化逐渐平缓并趋近于 0。a 和 b 都随 n 的增大而增大，说明 n 增大会使流体内部压力减小。因为 u 为 4 mm 和 6 mm 时裂隙内部无流体通过，所以没有 n = 10 的数据，故以 n = 1 和 n = 2 的情况为例，n = 1，u = 10 mm 时 a 的值比 u = 4 mm 时减小了 88.3%，u = 10 mm 时 b 的值比 u = 4 mm 时减小了 95.2%；n = 2，u = 10 mm 时 a 的值比 u = 4 mm 时减小了 95.4%，u = 10 mm 时 b 的值比 u = 4 mm 时减小了 99.7%。可以看出 a 和 b 的变化曲线随 n 增大逐渐变陡，对于 n = 5 和 n = 10 时变陡趋势更加明显。这一结果主要归因于 n 增大会导致裂隙闭合得更加紧密，而 a、b 的增加主要归因于裂隙的闭合，以及随着接触面积的增加导致的流动弯曲度的增加。

临界体积流量 Q_c 随剪切位移和循环次数变化规律如图 8 所示。Q_c 为式（9）中 E = 0.1 时对应的

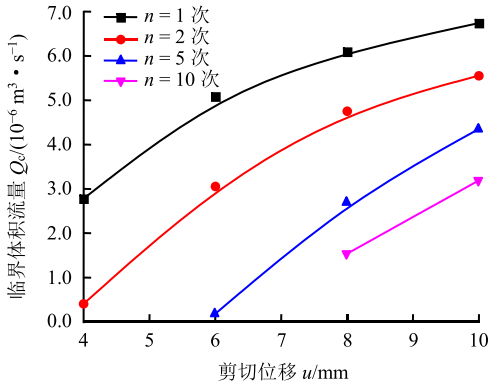


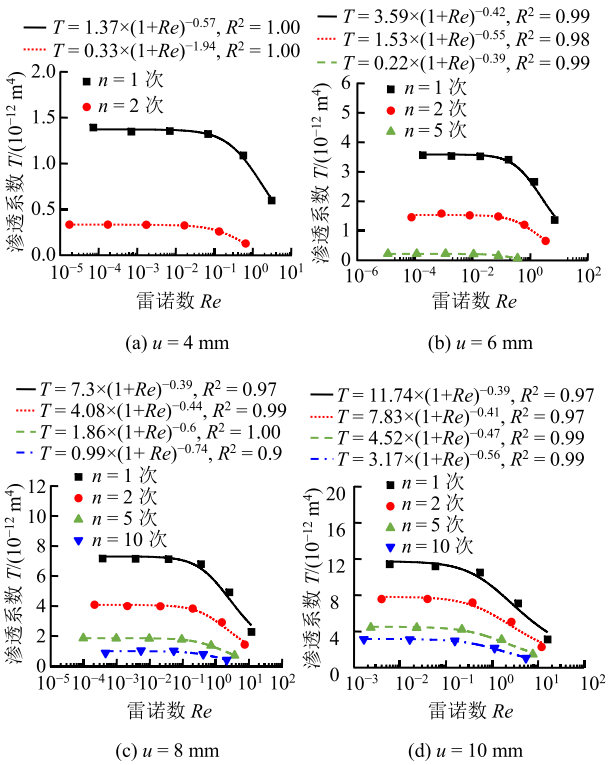
图 8　临界体积流量随剪切位移和循环次数变化规律

Fig.8　Relationship between the critical volume flow Q_c and u under different number of cycles

Q，为流体流动状态从线性进入非线性的临界体积流速。Q_c 随 u 增大而增大，随 n 增大而减小。

3.3 渗透性演化规律

图 9 为 T 随 Re 变化规律。可以看出，T 随 Re 变化呈幂函数关系逐渐降低，且减小速率逐渐变小。图中 R^2 为决定系数，Re 刻度为 lg 型，故曲线表现得变小趋势不明显。计算斜率可知，T 随 Re 减小速率逐渐变小，进一步说明了流体流动过程中有非线性的存在。当 Re 一定时，T 随 n 增大而减小，随 u 增大而增大。为了更直观表示 T 随 Re 变化情况，图 10 描述了 T/T_0 随 Re 变化趋势。随着 Re 增大，T/T_0 减小，当 $Re>0.1$ 时，u 一定，T/T_0 随 n 增大而减小。T/T_0 随 Re 的变化关系用式（12）拟合，不同 u 和 n 条件下拟合系数皆接近 1，说明本研究与 Zimmerman 等[26]的研究相吻合，进一步验证了本数值模拟试验结果的准确性。



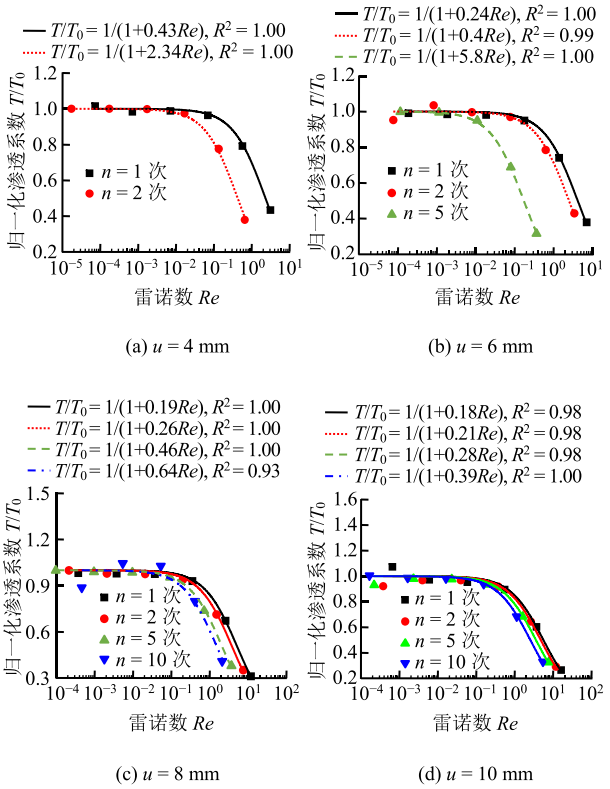
(a) u = 4 mm (b) u = 6 mm

(c) u = 8 mm (d) u = 10 mm

图 9 渗透系数随雷诺数变化关系

Fig.9 Relationships between Reynolds number *Re* and the transmissivity *T*

式（12）中β随 u 变化规律曲线如图 11 所示，随着 u 增加，β呈逐渐减小的趋势。以 n = 1 和 n = 2 为例，n = 1 时随着 u 增加，系数β分别为 0.43(u = 4 mm)、0.24(u = 6 mm)、0.19(u = 8 mm)、0.18(u = 10 mm)，减小了 58.1%,；n = 2 时不同 u 下，β分别为 2.34(u = 4 mm)、0.4(u = 6 mm)、0.26(u = 8 mm)、0.21(u = 10 mm)，减小了 91%。随着 n 增大，β随 u 的减小幅度呈增大的趋势。



(a) u = 4 mm (b) u = 6 mm

(c) u = 8 mm (d) u = 10 mm

图 10 归一化渗透系数随雷诺数变化规律

Fig.10 Relationships between Reynolds number *Re* and normalized transmissivity *T*/*T*$_0$

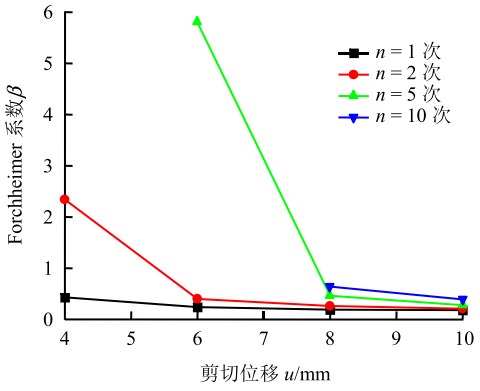


图 11 Forchheimer 系数随剪切位移和循环次数变化

Fig.11 Variations in the Forchheimer coefficient β during the cyclic shear process

4 结 论

本文通过开展法向应力σ_n为 2 MPa，剪切位移 u 分别为 4、6、8、10 mm，循环次数 n 分别为 1、2、5、10 次的循环剪切渗流数值模拟试验，探明了循环剪切过程中裂隙的接触面积分布和开度空间变化规律，计算了水力梯度 J 随体积流量 Q 变化规律，

归一化渗透系数 T/T_0 随雷诺数 Re 变化规律，并讨论了 T/T_0-Re 拟合关系式中 Forchheimer 系数β随 u 和 n 的变化情况：

（1）循环剪切过程中裂隙开度服从高斯分布。高斯分布方差σ随 n 无明显变化，但随 u 线性增加，说明裂隙面的各向异性随 u 增加而增大。u 一定时，力学开度值 e_m 随 n 增大而减小；n 一定时，e_m 随 u 增大而增大。

（2）循环剪切过程中流体在裂隙中流动表现出明显的沟槽流特征，流线随 u 增大而变得曲折，随 n 增大而逐渐平缓。J 随 Q 变化的规律与 Forchheimer 理论相吻合，表现出明显的非线性，随着 n 增大，流体流动的非线性愈发明显。临界体积流量 Q_c 随 u 增大而增大，随 n 增大而减小。非线性系数 b 比线性系数 a 总体大 5 个数量级，与前人研究结果一致。随着 u 从 4 mm 增大到 10 mm，n = 1 时，a 减小了 88.3%，b 减小了 95.2%；n = 2 时 a 减小了 95.4%，b 减小了 99.7%。可以看出 a 和 b 的变化曲线随 n 增大逐渐变陡，对于 n = 5 次和 n = 10 次时变陡趋势更加明显。

（3）T 随 Re 变化呈幂函数规律逐渐降低，且减小速率逐渐变小。T 在 u = 10 mm，n = 1 时达到最大；在 u = 4 mm，n = 5，10 和 u = 6 mm，n = 10 次时为 0，说明 u 对单裂隙渗透率有促进作用，n 对单裂隙渗透性有抑制作用。T/T_0-Re 用 Zimmerman 等[26]提出的公式进行拟合，拟合度趋近 1。随着 u 从 4 mm 增加到 10 mm，拟合公式中的 Forchheimer 系数β呈逐渐减小的趋势，n = 1 次时，随着 u 增加，β减小了 58.1%；n = 2 次时，随着 u 增加，β减小了 91%。随着 n 增大，β的减小幅度有增大的趋势。

参 考 文 献

[1] 张洪伟, 万志军, 赵毅鑫, 等. 深层地热储层水力剪切增透机制研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3173-3184.
ZHANG Hong-wei, WANG Zhi-wei, ZHAO Yi-xin, et al. A review of the research on the mechanism of hydro-shearing in geothermal reservoir[J]. **Journal of China Coal Society**, 2021, 46(10): 3173-3184.

[2] 刘日成, 尹乾, 杨瀚清, 等. 恒定法向刚度边界条件下三维粗糙节理面循环剪切力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(6): 1092-1109.
LIU Ri-cheng, YIN Qian, YANG Han-qing, et al. Cyclic shear mechanical properties of 3D rough joint surfaces under constant normal stiffness(CNS) boundary conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(6): 1092-1109.

[3] BELEM T, HOMAND-ETIENNE F, SOULEY M. Quantitative parameters for rock joint surface roughness[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2000, 33(4): 217-242.

[4] MIRZAGHORBANALI A, NEMCIK J, AZIZ N. Effects of shear rate on cyclic loading shear behaviour of rock joints under constant normal stiffness conditions[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2014, 47(5): 1931-1938.

[5] MIRZAGHORBANALI A, NEMCIK J, AZIZ N. Effects of cyclic loading on the shear behaviour of infilled rock joints under constant normal stiffness conditions[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2014, 47(4): 1373-1391.

[6] HAN G, JING H, JIANG Y, et al. Effect of cyclic loading on the shear behaviours of both unfilled and infilled rough rock joints under constant normal stiffness conditions[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2020, 53(1): 31-57.

[7] 夏才初, 喻强锋, 钱鑫, 等. 常法向刚度条件下岩石节理剪切–渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 40(1): 57-66.
XIA Cai-chu, YU Qiang-feng, QIAN Xin, et al. Experimental study of shear-seepage behaviour of rock joints under constant normal stiffness[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 40(1): 57-66.

[8] 张文泉, 袁久党, 王忠昶, 等. 采动裂隙岩体压剪渗透规律试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2473-2479.
ZHANG Wen-quan, YUAN Jiu-dang, WANG Zhong-chang, et al. An experimental study on compressive shear seepage laws of mining-induced fractured rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(9): 2473-2479.

[9] HUANG N, LIU R, JIANG Y. Numerical study of the geometrical and hydraulic characteristics of 3D self-affine rough fractures during shear[J]. **Journal of Natural Gas Science & Engineering**, 2017, 45: 127-142.

[10] YIN Q, JING H, LIU R, et al. Experimental study on stress-dependent nonlinear flow behavior and normalized transmissivity of real rock fracture networks[J]. **Geofluids**, 2018, 8217921:Doi.org/10.1155/2018/8217921.

[11] 蒋宇静, 王刚, 李博, 等. 岩石节理剪切渗流耦合试验及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2253-2259.

JIANG Yu-jing, WANG Gang, LI Bo, et al. Experimental study and analysis of shear-flow coupling behaviors of rock joints[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(11): 2253-2259.

[12] FANG Y. Induced microearthquakes and seismicity-permeability relationships in fractures[D]. Philadelphia: The Pennsylvania State University, 2017.

[13] HUANG N, LIU R, JIANG Y, et al. Effects of fracture surface roughness and shear displacement on geometrical and hydraulic properties of three-dimensional crossed rock fracture models[J]. **Advances in Water Resources**, 2018, 113: 30-41.

[14] International Society for Rock Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1978, 15(6): 319-368.

[15] GUAN R, JIE Y, LONG C, et al. Laboratory investigation of nonlinear flow characteristics in rough fractures during shear process[J]. **Journal of Hydrology**, 2016, 541: 1385-1394.

[16] BROWN E. Rock characterization, testing & monitoring: ISRM suggested methods[J]. **Biospectroscopy**, 1981, 18(6): 109.

[17] ROCHES M. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. **Rock Mechanics**, 1977, 10(1): 1-54.

[18] MYERS N. Characterization of surface roughness[J]. **Wear**, 1962, 5(3): 182-189.

[19] TSE R. Estimating joint roughness coefficients[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1979, 16(5): 303-307.

[20] XIONG X, LI B, JIANG Y, et al. Experimental and numerical study of the geometrical and hydraulic characteristics of a single rock fracture during shear[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2011, 48(8): 1292-1302.

[21] BRUSH D J, THOMSON N R. Fluid flow in synthetic roughwalled fractures: Navier-stokes, stokes, and local cubic law simulations[J]. **Water Resources Research**, 2003, 39(4): 1037-1041.

[22] XIE L, GAO C, REN L, et al. Numerical investigation of geometrical and hydraulic properties in a single rock fracture during shear displacement with the Navier–Stokes equations[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2015, 73(11): 7061-7074.

[23] BORDIER C, ZIMMER D. Drainage equations and non-Darcian modelling in coarse porous media or geosynthetic materials[J]. **Journal of Hydrology**, 2000, 228(3): 174-187.

[24] LIU R, LI B, JIANG Y. Critical hydraulic gradient for nonlinear flow through rock fracture networks: the roles of aperture, surface roughness, and number of intersections[J]. **Advances in Water Resources**, 2016, 88: 53-65.

[25] ZENG Z, GRIGG R, A criterion for non-Darcy flow in porous media[J]. **Transport Porous Media**, 2006, 63(1): 57-69.

[26] ZIMMERMAN R, AL-YAARUBI A, PAIN C, et al. Non-linear regimes of fluid flow in rock fractures[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(Suppl.1): 163-169.

[27] MOUTSOPOULOS K, PAPASPYROS I, TSIHRINTZIS V. Experimental investigation of inertial flow processes in porous media[J]. **Journal of Hydrology**, 2009, 374(3-4): 242-254.

[28] 蒋中明, 陈胜宏, 冯树荣, 等. 高压条件下岩体渗透系数取值方法研究[J]. 水利学报, 2010, 41(10): 1228-1233.
JIANG Zhong-ming, CHEN Sheng-hong, FENG Shu-rong, et al. Study on the method for evaluating rock mass permeability coefficient[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2010, 41(10): 1228-1233.

[29] 尹乾, 靖洪文, 孟波, 等. 恒定法向刚度条件下三维粗糙裂隙面剪切力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(11): 2213-2225.
YIN Qian, JING Hong-wen, MENG Bo, et al. Shear mechanical properties of 3D rough rock fracture surfaces under constant normal stiffness conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(11): 2213-2225.

[30] LIU R, LI B, JIANG Y. A fractal model based on a new governing equation of fluid flow in fractures for characterizing hydraulic properties of rock fracture networks[J]. **Computers and Geotechnics**, 2016, 75: 57-68.

[31] LIU R, JIANG Y, LI B. Effects of intersection and dead-end of fractures on nonlinear flow and particle transport in rock fracture networks[J]. **Geosciences Journal**, 2016, 20(3): 415-426.