

DOI: 10.11779/CJGE20240363

# 粗糙裂隙渗流-溶蚀耦合过程可视化试验及渗透性演化规律研究

王 婷, 王子龙, 李炎隆\*, 何亚宁

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 西南地区岩溶区域分布广泛, 水资源丰富, 是中国未来水资源开发的主战场。探究岩溶过程中溶蚀模式的发育规律及其对岩体渗透特性影响, 对保证涉及岩溶发育区的水利工程设施的选址、建设及长期运行安全至关重要。为此, 研发了粗糙裂隙渗流-溶蚀耦合过程实时可视化试验平台, 开展了不同流速下的粗糙裂隙渗流-溶蚀试验, 研究了流速影响下粗糙裂隙溶蚀形态、溶蚀速率、裂隙开度变化、溶蚀模式转变及渗透性演化规律。试验观测到: 随着流速的增加, 溶蚀模式从紧凑溶蚀转变为“虫孔”溶蚀, 进而转变为均匀溶蚀。根据穿透长度理论, 定义了考虑裂隙长度的有效  $Da$  数  $Da_{eff,L}$ , 确立了溶蚀模式从紧凑溶蚀向“虫孔”溶蚀, 进而向均匀溶蚀转变的临界转变条件分别为  $Da_{eff,L} \approx 10$  与  $Da_{eff,L} \approx 1$ , 并得到了本文试验结果的验证。渗流-溶蚀耦合作用使裂隙渗透率的变化规律不再符合立方定律; 在相同的开度变化时, “虫孔”溶蚀的渗透率增长最迅速, 并远远大于立方定律, 所需突破流量  $PV_{bt}$  最小。研究成果可为自然及工程中岩溶过程的认识与控制提供参考依据与技术思路。

**关键词:** 粗糙裂隙; 渗流-溶蚀耦合; 可视化试验; 理论判据; 渗透率演化

中图分类号: TV139.16 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)08-1662-10

作者简介: 王 婷 (1994—), 女, 讲师, 主要从事水工渗流与物质运移方面的研究工作。E-mail: wting@xaut.edu.cn。

## Visualization experiments study on coupling process of flow-erosion in rough fractures and evolution of permeability

WANG Ting, WANG Zilong, LI Yanlong, HE Yaning

(State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The karst areas are widely distributed in Southwest China where there are abundant water resources. They will be the main battlefield of development of water resources in China. It is very important to explore the basic law of the coupling process of flow and erosion and its influences on the permeability of the rock mass so as to ensure the rationality of the site selection, the safety of the construction and the long-term operation of these hydraulic engineering facilities in the karst areas. For this purpose, a flow visualization experiment device with a soluble transparent rough fracture is designed. The erosion experiments in rough fractures are carried out to investigate the influences of the flow rate on the erosion morphologies, erosion rate, transition of erosion patterns and evolution of permeability of the fractures. The results show that with the increase of the flow rate, the erosion patterns shift from compact to wormhole, and finally to uniform patterns. Based on the penetration theory, an efficient  $Da$  number  $Da_{eff,L}$  is defined. Then, the criteria for the transition of erosion patterns from compact to wormhole and from wormhole to uniform are defined as  $Da_{eff,L} \approx 10$  and  $Da_{eff,L} \approx 1$  respectively. The criteria are validated by the experimental results. The coupling effects of flow and erosion increase the permeability of fracture, and their trends do not accord with the cubic law. With the same aperture enlargement, the permeability of wormhole erosion increases the most rapidly and is much greater than the cubic law. The required breakthrough volume of "wormhole" patterns is the smallest. This research can provide a theoretical and experimental basis for the prediction and evolution of permeability control of karst processes in natural and engineering applications.

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (52309145); 中国博士后面上基金项目 (2023M732829) This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.52309145) and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No.2023M732829).

收稿日期(Received): 2024-04-16 修回日期(Revised): 2024-08-23 接受日期(Accepted): 2024-09-29 网络出版日期(Online): 2024-09-30

\*通信作者 (E-mail: yanlongli@xaut.edu.cn)

**Key words:** rough fracture; flow-erosion coupling; visualization experiment; theoretical criterion; evolution of permeability

## 0 引言

随着中国“一带一路”倡议与西部大开发战略的实施,水能资源开发逐渐向岩溶区分布更为广泛的西部、上游河段推进。尤其在西南地区,岩溶区域面积占比达到42.9%,是全球三大岩溶集中分布区之一,这些广袤的岩溶区拥有丰富的水资源有待开发。涉及岩溶发育区的水利基础设施(包括大坝、水库、抽水蓄能电站、调水工程等)的选址、建设及长期运行安全成为共同关注的挑战性难题。

岩体裂隙是地下流体和物质传输的主要通道。一旦裂隙中的水流具有侵蚀特性,地下水中的活性物质将溶蚀岩石裂隙中的可溶性矿物,诱发溶蚀通道,进而发育了多样的溶蚀形态和溶蚀模式<sup>[1-3]</sup>。这些不同的溶蚀模式的形成,对可溶岩体的孔隙结构、渗透性改变等起决定性作用<sup>[4-5]</sup>,从而进一步影响地下水的运移方向。而溶蚀通道的形成,显著改变了岩体的渗透特性,导致库水渗漏,使坝基岩体失稳概率显著提升。由此可见,探究裂隙岩体渗流-溶蚀耦合机理是保障岩溶区水利能源设施长期、稳定蓄水的基础性工作。大量研究结果表明,溶蚀模式的形成与裂隙介质的固有性质(如裂隙长度、矿物非均质性、粗糙度)、流动条件(注入流速、重力效应)和流体性质(可溶性物质浓度)等密切相关<sup>[6-11]</sup>。在细观尺度上,岩石裂隙溶蚀过程受控于物质迁移速率(包括强迫对流速率、溶质的扩散速率)和表面反应速率,将形成紧凑溶蚀、优势通道溶蚀(“虫孔”溶蚀)、均匀溶蚀等不同的溶蚀模式<sup>[12-13]</sup>。为对比3种作用的强弱,国际上通常采用佩可莱数( $Pe$ )表示对流作用与扩散作用的强弱,采用达姆科勒数( $Da$ )表示表面反应作用与扩散作用的强弱。 $Pe$ 数和 $Da$ 数分别定义为: $Pe=vb/D$ 与 $Da=k/v$ 。式中: $v$ 为裂隙内流体平均流速, $b$ 为裂隙开度, $D$ 为溶质的扩散速率, $k$ 为可溶性物质的溶蚀速率常数。通常,当对流作用较小( $Pe$ 数较小)时,溶蚀将集中发生在入口附近,形成紧凑溶蚀;当对流作用远远大于扩散作用( $Pe$ 数较大),或反应速率远小于物质迁移速率( $Da$ 数较小)时,溶蚀较均匀地发生在整个流域范围内,形成均匀溶蚀。当物质迁移速率与反应速率相当时,反应物质的迁移将加速溶蚀速率,进而增强已溶蚀区域的对流作用,局部导流能力得以加强,此种迁移-反应速率的正向反馈机制将诱发溶蚀通道的形成<sup>[14]</sup>。此种具有优势通道的溶蚀模式被命名为“虫孔”溶蚀。

在裂隙尺度上,一方面,水动力条件和流体性质

是影响溶蚀模式的重要因素。Detwiler等<sup>[6]</sup>研究了流速对溶蚀模式的影响,认为流速较大时将形成均匀溶蚀模式,而流速适中时,将形成“虫孔”溶蚀模式。Pereira等<sup>[7]</sup>通过对溶蚀后的岩芯进行CT扫描,指出均匀溶蚀模式将发生在 $Pe>1$ 及 $Ki=Pe\cdot Da<1$ 范围内,揭示了扩散-对流与反应速率控制溶蚀模式的细观机制。申方林等<sup>[8]</sup>通过Lattice-Boltzmann方法对粗糙单裂隙的渗流溶蚀模拟结果揭示了 $Pe$ 数较大将形成均匀溶蚀, $Da$ 数较大时将形成紧凑溶蚀的规律。另一方面,裂隙的物理性质也被认为是影响溶蚀的模式的关键因素之一。Szmyczak等<sup>[9]</sup>通过数值模拟和理论分析认为,裂隙长度较短则造成“虫孔”未充分发展,从而形成均匀溶蚀模式。Starchenko等<sup>[10]</sup>的数值模拟结果表明,在较小的流速范围内( $Pe<4$ ),裂隙长度对溶蚀模式转变无明显影响;而在较大流速范围内,裂隙长度对“虫孔”溶蚀向均匀溶蚀的转变影响显著。然而,以上研究大多采用数值模拟方法进行研究,或者采用无粗糙度的平行板进行试验,对于真实粗糙裂隙的渗流-溶蚀试验研究仍鲜有报道。并且,对于溶蚀模式转变的临界条件也仍没有提出统一有效的理论判别条件,亟待开展更丰富的试验和理论研究阐明溶蚀模式及裂隙渗透特性的转变机理。

试验研究技术方面,基于照相机/显微镜观测的微观模型试验已成为目前岩石介质内部流体过程的研究主要手段之一<sup>[15]</sup>。目前,研究人员大多采用基于CT扫描的岩芯溶蚀试验,这些试验不仅价格昂贵,且扫描速率慢,成像像素低。与之相比,微观模型渗流-溶蚀试验具有以下优点:①试验重复性好。通过反复使用同一裂隙模型,实现相同裂隙的重复试验;通过精准控制注入/出口的关键因素,实现溶蚀试验结果的可重复性。②制作工艺简单,成本低廉。能够实现对微观溶蚀模型的低成本快速装配。③可视化效果好。通过CCD相机/光学显微镜可实现对整个溶蚀过程的实时动态观测,图像采集速率可达到27帧/s,采集像素可达到0.03 mm/像素,远远优于CT扫描技术的成像效果。然而,以往的微观模型溶蚀试验研究通常采用光滑平行板或填充可溶颗粒<sup>[4, 15]</sup>,难以反映自然界中的真实岩石裂隙的粗糙壁面特征。这为本文拟开展的粗糙岩石裂隙的渗流-溶蚀耦合过程的试验研究提供了思路。

基于以上研究现状,本文研发了粗糙裂隙渗流-溶蚀可视化试验技术,实现了粗糙裂隙渗流-溶蚀过程的实时、动态及可重复观测,开展了不同流速下的真实粗糙裂隙溶蚀试验,研究了流速影响下粗糙裂隙溶

蚀形态、溶蚀速率、裂隙开度变化、溶蚀模式转变及渗透性演化规律, 以期为保证可溶岩区坝基工程防渗安全等提供理论依据。

## 1 试验平台及试验流程

### 1.1 渗流-溶蚀过程可视化平台

本文研发了图 1 (a) 所示的粗糙裂隙渗流-溶蚀可视化试验平台。该平台主要包括可溶透明裂隙模型、成像系统、流体控制系统三部分, 实现了溶蚀过程实时、动态以及可重复性观测。

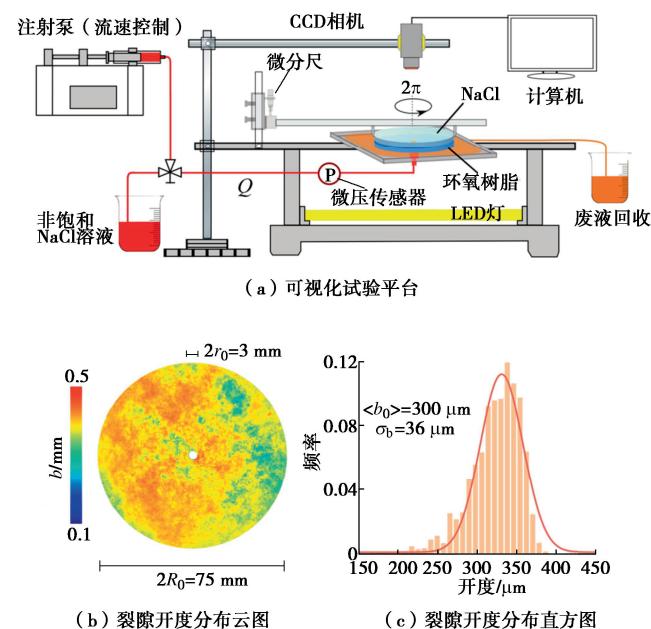


图 1 粗糙裂隙溶蚀过程可视化试验装置及裂隙信息

Fig. 1 Schematic diagram of a flow visualization system for erosion experiments and details of rough fracture

(1) 可溶透明裂隙模型。为了较好地反映真实裂隙的特性, 可溶粗糙裂隙模型由透明粗糙岩石裂隙面和光滑 NaCl 晶体(原产自四川自贡)组装而成。自然界中溶蚀过程的载体大多为碳酸盐岩, 然而, 碳酸盐岩通常为非透明晶体, 难以满足本文研究粗糙裂隙面溶蚀过程的可视化观测的需求, 鉴于此, 本文选用 NaCl 晶体作为溶蚀介质, 虽然其与碳酸盐岩具有反应学动力特征、晶体结构等理化性质方面的不同, 然而考虑到本文研究的重点仍是流速对溶蚀形态及模式转变的影响这一机理问题, 因此选用 NaCl 晶体能够实现透光性好, 溶蚀过程实时动态观测的研究目的。由于溶蚀试验为破坏性试验, 光滑 NaCl 晶体仅可溶蚀一次。为保证溶蚀试验的裂隙面保持一致, 透明粗糙岩石裂隙由 3D 打印制成, 打印材料选择有机玻璃(PMMA)。打印的裂隙面起伏由真实裂隙的三维扫描结果确定, 打印精度  $\pm 10 \mu\text{m}$ , 保证试验中可溶裂隙模

型参数符合真实裂隙。裂隙的平均开度为  $\langle b_0 \rangle = 300 \mu\text{m}$ , 方差为  $\sigma_b = 36 \mu\text{m}$ 。为探究裂隙尺寸对溶蚀模式的影响, 选取半径  $R_0$  为 37.5 mm 的圆形裂隙, 裂隙中心打  $r_0 = 1.5 \text{ mm}$  入流孔, 裂隙总体积为 1.36 mL, 裂隙的开度分布云图如图 1 (b) 所示。裂隙开度分布直方图及高斯拟合曲线如图 1 (c) 所示, 裂隙开度大致符合高斯分布。由于溶蚀试验裂隙面需多次重复, 因此在每次试验结束后需将粗糙裂隙面冲洗干净并干燥后重复使用。

(2) 成像系统。为了实时动态的获取溶蚀过程中的裂隙开度分布时空特征, 在可溶裂隙模型的上下分别装载了高分辨率 CCD 相机和平面光源。CCD 相机负责采集溶蚀过程中的裂隙图像(1 帧/s, 2.5  $\mu\text{m}/\text{像素}$ ), 通过数据线与电脑连接, 将采集的图像实时传入电脑。

(3) 流量控制系统。为实现 0.1~10 mL/min 范围内的流速可控, 采用高精度流量注射泵(Harvard Apparatus 703007, USA)和微流注射器(Hamilton, USA, 100 mL)。试验中, 为测定溶蚀过程中粗糙裂隙渗透系数的变化, 在入口处设置一个微压力传感器(Everflow Pressure Sensor, MPS0, MPS1)测定入口压力。

### 1.2 试验流程

试验过程包括 4 个阶段: NaCl 溶液配制、可溶裂隙模型组装、饱和 NaCl 溶液静置、非饱和 NaCl 溶液溶蚀。

(1) NaCl 溶液配制。溶蚀试验前, 称取特定质量的去离子水(产自 EMD Millipore, Milli-Q)和完全干燥的 NaCl 粉末(沪试, 分析纯 AR, 纯度 99%), 混合后搅拌, 配制固定浓度(饱和、95% 浓度)NaCl 溶液。为了精确获取溶蚀过程开度变化引起的光强度改变, 采用亮蓝染剂(Erioglaucine disodium salt, 迈凯瑞, 纯度 100%)对 NaCl 溶液进行染色, 染色浓度 1/16 g/L 为 Detwiler 等<sup>[16]</sup>确定的最佳浓度, 染色溶液的吸收波长为  $630 \pm 2 \text{ nm}$ 。进而, 将染色后的溶液置于真空箱里抽取真空 5 min, 以去除液体内多余的空气。用图 1 (a) 中所示注射泵以固定流速 1 mL/min 抽取制备的脱气 NaCl 溶液以备使用。

(2) 可溶裂隙模型组装。由于粗糙裂隙的溶蚀过程是破坏性的, 光滑 NaCl 晶体仅可溶蚀一次。因此, 为了确保溶蚀试验裂隙开度分布的可重复性, 将可溶裂隙模型的上下面固定于自主设计的置物架(图 1(a))上, 该置物架通过调节微分螺旋尺控制平均开度至某一固定值。同时, 采用质量法<sup>[17]</sup>对组装成功的裂隙场进行开度测定, 确定开度分布差异, 保证相同的裂隙开度分布差异在固定范围内(相对误差小于  $\pm 5\%$ )。

(3) 饱和 NaCl 溶液静置。可溶裂隙模型组装好之后, 用注射泵以极低的流速(0.01 mL/min)注射饱

和NaCl溶液至裂隙中, 并保证裂隙内无气泡存在; 待溶液充满裂隙后, 将整个装置在25°C常压下静置1 h, 以保证整个系统处于平衡状态。

(4) 非饱和NaCl溶液溶蚀。调节多通阀至非饱和溶液的通道, 用注射泵将非饱和NaCl溶液以恒流速 $Q$ 注入裂隙内, 裂隙开度增加、流体厚度增加, 裂隙透光强度减弱。同时, 采用MATLAB的自编程序控制CCD相机对溶蚀过程的裂隙光强度变化进行记录, 为后续的开度演化重构提供图像数据支持。

上述试验过程温度均保持在25±0.5°C。开展6组不同的流速(0.05, 0.1, 0.5, 1, 2, 3 mL/min)的溶蚀试验。需要指出的是, 对于圆形裂隙, 计算佩可莱数( $Pe$ )与达姆科勒数( $Da$ )时, 平均流速 $v$ 采用整个裂隙中的平均流速:  $v=Q/(\pi R_0 \langle b \rangle)$ ; 则圆形裂隙的 $Pe$ 和 $Da$ 数的定义为 $Pe=Q \langle b_0 \rangle / (\pi R_0 D)$ 与 $Da=(\pi R_0 \langle b_0 \rangle k)/Q$ , 式中:  $Q$ 为注入流速(m<sup>3</sup>/s);  $R_0$ 为裂隙长度;  $\langle b_0 \rangle$ 为裂隙初始平均开度;  $D=1.61 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s为扩散速率, 取25°C时NaCl在水中的扩散速率;  $k=5.5 \times 10^{-6}$  m/s为溶蚀速率常数, 根据Simon等<sup>[18]</sup>的试验数据取得。6组试验的具体试验参数及对应的 $Pe$ 和 $Da$ 数如表1所示。本研究对应的 $Pe$ 数的范围为4.4~264,  $Da$ 数范围为0.004~0.236, 均跨越2个数量级, 与自然条件及工程应用中常见的 $Pe$ 数及 $Da$ 数范围一致<sup>[11]</sup>。

试验过程中通过微压传感器记录入口压力 $P$ , 并通过式(1)进行裂隙渗透率的测定:

$$k = \frac{Q \mu \ln(r_0 / R_0)}{2 \pi \langle b \rangle (P - p_a)} \quad (1)$$

式中,  $\mu=1.0 \times 10^{-3}$  Pa·s为水的动力黏度;  $p_a$ 为标准大气压, 取100 kPa;  $\langle b \rangle$ 为裂隙平均开度。

### 1.3 溶蚀形态的重构

为了获取溶蚀过程裂隙开度时空演化过程, 本研究中基于Beer-Lambert定律对获取的图像进行处理, 图像处理和计算的过程如图2所示。Beer-Lambert定律描述了透射光强度 $I_b$ 和溶液染色剂浓度( $c_{dye}$ )以及溶液厚度( $b$ )之间的关系:

$$I_b = I_0 e^{-dc_{dye}b} \quad (2)$$

式中:  $I_0$ 为平面光源提供的稳定光强度;  $d$ 为溶蚀吸光常数。

获取溶蚀过程中开度的变化的过程如下: 首先, 取 $t$ 时刻的裂隙原图的图像(图2(a)), 采用Photoshop软件将图像多余部分裁除后, 并在MATLAB程序中采用filter2程序过滤掉多余的噪点(图2(b)), 采用自带的rgb2grey程序将图像转变为灰度图像, 再用double程序将记录图片光强度信息的8位灰度矩阵转变成双精度矩阵(图2(d))。采用相同的方法处理初始时刻的图像。进而, 将 $t$ 时刻的相机记录的图片的

光强值 $I_t$ (图2(d))和初始时刻记录的光强值 $I_{t=0}$ (图2(e))进行对比, 并通过Beer-Lambert定律的变形公式计算得到开度的变化值(图2(f)):

$$\Delta b = \frac{\ln(I_{t=0}/I_t)}{dc_{dye}} \quad (3)$$

式中: 参数 $dc_{dye}=205$ 经标定确定, 与光强度、裂隙介质固有属性等有关。由式(3)可知, 裂隙开度空间的重构仅与光源强度及染色溶液的染色剂浓度有关, NaCl溶液浓度对其透光率影响极小(约为0.1%)<sup>[19]</sup>, 因此, 可忽略NaCl溶液配置浓度误差对裂隙开度测试的影响。试验中装置的四周及顶部均罩黑色遮光布, 形成密闭无光空间, 仅采用光源稳定的LED平面光源作为唯一光源, 隔绝实验室环境光照变化的影响; 溶液流通管路采用抗腐蚀的硅胶管, 与NaCl溶液不发生反应, 进而消除管路对裂隙内溶液透光率的影响。最后, 采用MATLAB自带的color工具箱获取某时刻的开度变化云图(图2(g))。同时, 为验证以上方法的准确性, 本文还通过质量法<sup>[17]</sup>对溶蚀前后的裂隙开度空间进行再次测定, 保证两种方法获得的裂隙开度变化的差异在±5%以内, 从而保证该光学测定方法的可靠性。

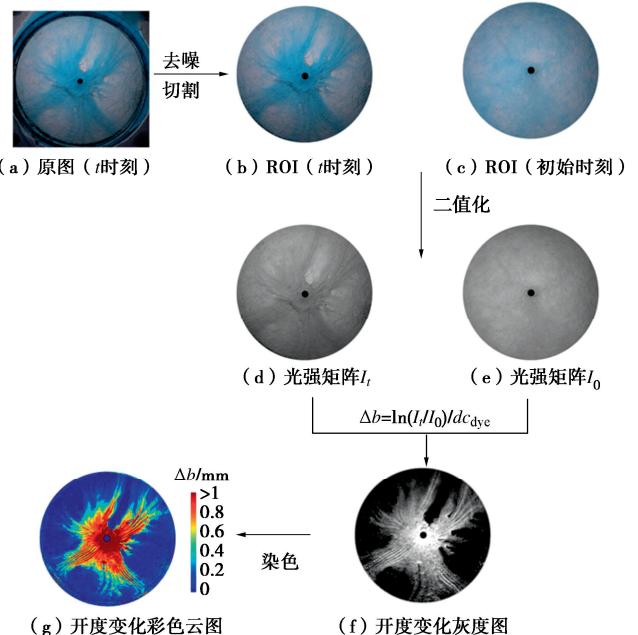


图2 溶蚀过程开度演化重构的图像后处理技术

Fig. 2 Image post-processing method for reconstruction of aperture change caused by erosion in rough fractures

### 1.4 形态学参数获取

为获取溶蚀模式的形态学特征, 本研究分别统计了溶蚀图像的溶蚀饱和度和分形维数, 两者的计算步骤如下: 首先, 将经计算得到最终时刻的开度变化矩阵图像(图2(g)), 以一固定阈值 $\langle \Delta b \rangle = \langle b_0 \rangle$ 转化为二值化图像, 以获取可统一对比的溶蚀图像。二值

化图像中的白色区域即为溶蚀区域的几何结构。此时, 定义溶蚀饱和度  $S_w$  为白色区域占总区域的面积之比。同时, 分型维数  $D_f$  的计算亦采用此二值化图像, 将该图像输入基于 MATLAB 的分形分析工具箱 Fraclab (<https://project/inria.fr/fraclab/>), 采用标准盒子计数法<sup>[20]</sup>计算分形维数。

## 2 溶蚀模式判据的理论推导

近 30 a 以来, 研究人员致力于用  $Pe$  和  $Da$  数来确定溶蚀模式的范围。Daccord 等<sup>[1]</sup>基于对单圆管溶蚀过程的研究, 指出紧凑溶蚀模式和“虫孔”溶蚀模式的临界点发生在  $Pe=1$ , 而均匀溶蚀发生在  $Da<1$  时; 在后续研究中, Golfier 等<sup>[4]</sup>通过多孔介质的溶蚀试验, 得到了截然不同的  $Pe$  和  $Da$  临界值。由此可见, 仅仅采用临界  $Pe$  和  $Da$  数确定溶蚀模式, 具有一定的局限性。故而, 研究人员采用溶蚀通道的特征长度来表征溶蚀模式的转变规律。Panga 等<sup>[21]</sup>采用代表平行于流向和垂直于流向的两个特征长度 ( $l_x$  和  $l_y$ ) 来表征多孔介质中溶蚀通道的形状, 其中  $l_x$  为溶蚀通道在平行于流向的穿透长度,  $l_y$  为溶蚀通道在垂直于流向的穿透长度。本文将此思想应用于粗糙裂隙中, 得出适用于径向流条件下粗糙裂隙溶蚀模式的理论判据。

### 2.1 溶蚀穿透长度的定义及推导

粗糙裂隙渗流-溶蚀过程中径向对流-扩散-反应方程可表示如下<sup>[9, 22-23]</sup>:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_r \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} - \bar{v} \frac{\partial C}{\partial r} - K_{\text{eff}} A_{\text{rxn}} (C - C_{\text{eq}}) \quad (4)$$

式中:  $C$  为溶液浓度;  $A_{\text{rxn}}=1/b_0$  为溶蚀面积;  $k_{\text{eff}}$  为有效溶蚀速率;  $D_r$  为受流动影响的径向的分子扩散速率<sup>[24]</sup>,  $D_r=(\alpha_{\text{as}}+\lambda_r Pe)$ ,  $\lambda_r=0.5$ ,  $\alpha_{\text{as}}=1$  分别是由裂隙介质的性质决定的常量。Lichtner 等<sup>[25]</sup>给出了当溶蚀通道前端位于  $l_f$  处时, 式 (4) 的解析解:

$$C(r) = C_{\text{eq}} - (C_{\text{eq}} - C_1) e^{-l_f(r-r_f)} \quad (5)$$

式中:  $C_{\text{eq}}$  为饱和浓度;  $l_f$  即溶蚀通道在径向的穿透长度, 可表示为<sup>[25]</sup>

$$l_f = \frac{n \langle b_0 \rangle}{Da_{\text{eff}}} \quad (6)$$

式中:  $Da_{\text{eff}}=\pi k_{\text{eff}} R_0 \langle b_0 \rangle / Q$ , 其中  $k_{\text{eff}}=k/[1+k \langle b_0 \rangle / (DSh)]$  表示有效溶蚀速率, 且  $k$ ,  $R_0$ ,  $\langle b_0 \rangle$ ,  $Q$ ,  $D$  都具有明确的物理意义;  $Sh$  为舍伍德常数, 对于单面溶解  $Sh=5$ <sup>[9]</sup>。 $n$  为溶蚀的表面数, 本文取  $n=1$ 。

### 2.2 “虫孔”溶蚀与均匀溶蚀的临界判据

径向流中的溶蚀模式可由径向穿透长度  $l_f$  与裂隙长度  $R_0$  的比值决定。当穿透长度  $l_f$  大于裂隙长度  $R_0$  时, 溶蚀模式为均匀溶蚀, 即  $l_f > R_0$ <sup>[10]</sup>。据此, 认为溶蚀模式从“虫孔”溶蚀向均匀溶蚀转变的临界条件为

$l_f \approx R_0$ 。将式 (6) 代入  $l_f \approx R_0$ , 得

$$\frac{R_0 Da_{\text{eff}}}{n \langle b_0 \rangle} \approx 1 \quad (7)$$

定义式 (7) 等式左侧为有效  $Da$  数  $Da_{\text{eff},L}$ 。根据  $k_{\text{eff}}$  和  $Da_{\text{eff}}$  的定义以及  $Da$ ,  $Pe$  数定义, 可计算得

$$\frac{1}{Da_{\text{eff}}} = \frac{1}{Da} + \frac{Pe}{Sh} \quad (8)$$

最终, 将式 (7), (8) 联立, “虫孔”溶蚀向均匀溶蚀转变的改进理论判据为

$$Da_{\text{eff},L} = \frac{Da_{\text{eff}} R_0}{n \langle b_0 \rangle} = \frac{Da Sh}{Pe Da + Sh} \frac{R_0}{n \langle b_0 \rangle} \approx 1 \quad (9)$$

可见, 定义的  $Da_{\text{eff},L}$  与  $Pe$  数、 $Da$  数、裂隙尺寸  $R_0$ 、裂隙开度  $\langle b_0 \rangle$  均相关。

### 2.3 紧凑溶蚀与“虫孔”溶蚀的临界判据

当径向穿透长度  $l_f$  远小于裂隙长度  $R_0$  时, 大部分的晶体溶蚀发生在注入口附近, 从而形成了紧凑溶蚀。记  $\gamma=l_f/R_0$ , 可推出溶蚀模式从紧凑溶蚀转变为“虫孔”溶蚀的临界条件为  $l_f=\gamma R_0$ , 式中  $\gamma \approx 0.1$  为常数, 表示溶蚀范围仅占裂隙长度的 1/10, 根据试验结果取近似值。

进而, 紧凑溶蚀向“虫孔”溶蚀的理论判据为

$$Da_{\text{eff},L} \approx 10 \quad (10)$$

据此, 总结了本文试验的  $Pe$ ,  $Da$ ,  $l_f$ ,  $\gamma$ ,  $Da_{\text{eff},L}$  值, 供后续分析, 如表 1 所示。

表 1 试验  $Pe$ ,  $Da$ ,  $Da_{\text{eff},L}$  值

Table 1 Experimental of  $Pe$ ,  $Da$  and  $Da_{\text{eff},L}$  value

流速 $Q/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	$Pe$	$Da$	$L_f/\text{cm}$	$\gamma$	$Da_{\text{eff},L}$
0.05	4.4	0.236	0.18	0.04	29.90
0.1	8.8	0.118	0.36	0.09	14.90
0.5	44	0.024	1.79	0.47	2.90
1	88	0.012	3.58	0.94	1.40
2	176	0.006	7.16	1.88	0.74
3	264	0.004	10.70	2.83	0.49

## 3 结果分析

### 3.1 溶蚀模式的试验观测

为了探究流速对于裂隙介质溶蚀模式的影响机制, 开展了一系列不同流速下的渗流-溶蚀试验, 建立了不同流速下粗糙裂隙的溶蚀形态相图, 如图 3 所示。图 3 (a) (A~F) 所示为流速  $Q=0.05 \sim 3.0 \text{ mL/min}$ , 对应 Péclet 数  $Pe=4.4 \sim 264$ , 初始开度  $\langle b_0 \rangle = 300 \mu\text{m}$  时的 6 组试验结果, 可见 3 种典型的溶蚀模式: 图 3 (a) (A~B) 对应的紧凑溶蚀, 图 3 (a) (C~D) 对应的“虫孔”溶蚀, 图 3 (a) (E~F) 对应的紧凑溶蚀。相图从左到右代表溶蚀时间的不断增加, 裂隙开度变化云图中的蓝到红代表裂隙开度变化值越来越大, 深蓝色代表无溶蚀发生, 亦即裂隙开度无变化; 深红色代表此处发生了大量溶蚀, 裂隙开度变化最大。可见,

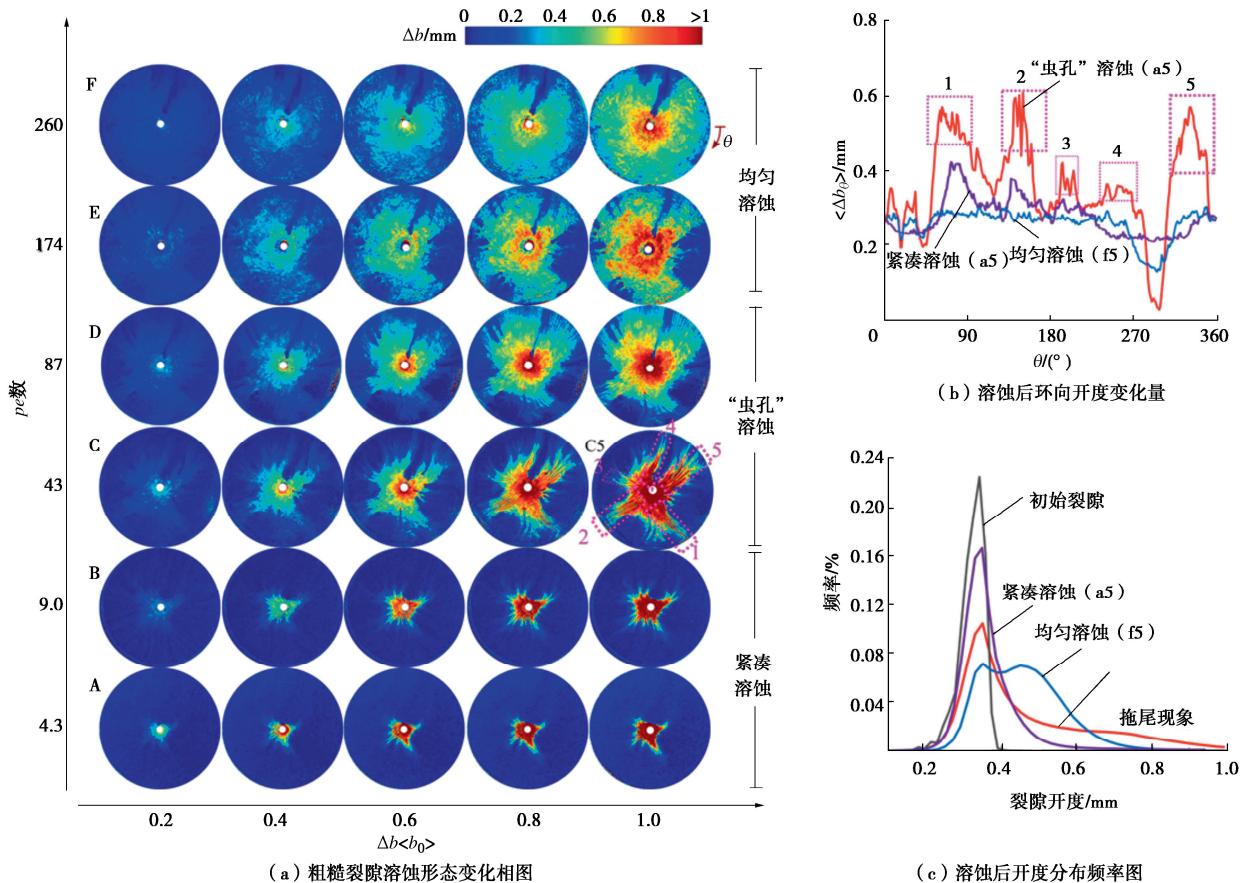


图 3 粗糙裂隙溶蚀形态变化相图

Fig. 3 Evolution of erosion features of rough fracture with erosion time

随着注入流量的增加, 总开度的增加逐渐增大, 表明在此种溶液浓度下, 未发生溶质的结晶过程, 裂隙内均为溶蚀引起的裂隙开度增加。

为了更直观地表征 3 种典型的溶蚀模式, 本节分析了溶蚀前后裂隙介质的开度分布频率和环向开度变化规律, 此分析均采用典型溶蚀形态最终时刻 ( $\langle\Delta b\rangle = \langle\Delta b_0\rangle$ ) 的溶蚀开度变化数据 (图 3 (a) (A~F) 中最右列), 如图 3 (b), (c) 所示。可见, 当流速较小时 ( $0.05\sim 1$  mL/min, 图 3 (a) (A~B)), 即当  $Pe \leq 8.8$  时, 溶蚀形态表现为紧凑溶蚀。其特征为注入流体只溶蚀了入口附近的 NaCl 晶体<sup>[26]</sup>, 这是由于低流速情况下, 注入流体在入口附近驻留时间较长, 从而溶蚀相对较多的晶体, 最终达到饱和, 使溶蚀部分和未溶蚀部分之间形成一个相对陡峭的边壁<sup>[27]</sup>。此外, 粗糙裂隙中的边壁并非光滑的, 这与光滑平行板中边壁光滑的溶蚀结果不同<sup>[28]</sup>, 这是由于裂隙的粗糙度对溶蚀形态产生了影响, 使不同开度处的溶蚀速率不同, 造成了粗糙的边壁, 如图 3 (b) 中的紫色曲线所示。此外, 粗糙裂隙中紧凑溶蚀也通常产生 1, 2 个峰, 而平行板溶蚀中通常没有这种明显的溶蚀倾向, 这是因为粗糙裂隙增强了溶蚀的各向异性, 从而增大了不均匀溶蚀的可能性<sup>[29]</sup>。同时为了表征此种紧凑溶蚀形态,

图 3 (c) 的开度分布频率图显示了溶蚀后的开度分布特征, 可见紧凑溶蚀后的开度分布频率与溶蚀之前形状相似, 但峰值开度明显增大, 这是由于溶蚀增大了入口附近的开度, 使开度值明显增大。

当流速相对较大时 ( $2\sim 3$  mL/min, 图 3 (a) (E~F)), 即当  $Pe \geq 176$  时, 溶蚀在裂隙范围内的所有区域呈现平均溶蚀形态, 即入口处与出口处的溶蚀几乎相同, 此种溶蚀形态称为均匀溶蚀。其环向开度变化也表现得较为平缓, 未有明显的“峰”或者“低谷”(图 3 (b))。且与“虫孔”溶蚀不同的是, 均匀溶蚀后的开度范围较初始裂隙整体右移 (图 3 (c)), 且呈现“双峰”形式。这是由于溶蚀区域发生了均匀的溶蚀, 整体开度增加且分布更为均匀。

当流速处于适中范围内, 即  $44 \leq Pe \leq 88$  (对应  $0.74 \geq Da_{eff,L} \geq 0.49$ ) 时, 溶蚀形态发育为明显的“虫孔”溶蚀。“虫孔”溶蚀的裂隙开度变化分布云图中发育了数个明显的优势通道<sup>[30]</sup>, 例如图 3 (a) -C5 的通道“1”~“5”, 在环向裂隙开度变化 (图 3 (b) 中红线) 中同样表现为明显的开度增加“峰” (“1”~“5”), 并导致在较大开度范围内呈现较长的拖尾<sup>[6, 31]</sup> (图 3 (c))。如前所述, 溶蚀通道的形成, 是由于粗糙裂隙内流场具有明显的各向异性, 侵蚀性溶液分布

较多的裂隙将首先发生溶蚀导致的。此时，注入的溶液也将更易进入此通道内，导致通道内可溶矿物进一步被溶蚀。此种溶蚀模式被形象地称为“虫孔”溶蚀。由于优势渗流通道的形成，“虫孔”溶蚀将导致裂隙渗透率的剧烈变化<sup>[32]</sup>，在以往的研究中往往最受重视。综上，可通过开度变化云图和开度分布特征清晰地判断紧凑溶蚀、虫孔溶蚀和均匀溶蚀。

### 3.2 溶蚀形态学定量化分析

上文对主要的溶蚀形态进行了开度分布的分析，但是溶蚀模式的形态学定量的判别方法仍然缺乏。为了定量化分析不同溶蚀模式的特征，本文采用 1.3 节图像分析方法中的分型维数  $D_f$  和溶蚀饱和度  $S_w$  对 6 组溶蚀模式进行了形态学的量化分析，结果如图 4 (a), (b) 所示。结果显示，随着  $Pe$  数的增加，溶蚀形态的  $D_f$  与  $S_w$  均呈单调增加趋势。同时，可观测到紧凑溶蚀模式集中在  $D_f \leq 1.72$ ,  $S_w \leq 0.18$  且  $Pe \leq 8.8$  区间内，均匀溶蚀模式集中在  $D_f \geq 1.93$ ,  $S_w \geq 0.75$  且  $Pe \geq 176$  区间内，“虫孔”溶蚀模式集中在  $D_f$  介于 1.79~1.83,  $S_w$  介于 0.45~0.65, 且  $Pe$  数介于 44~88。综上，溶蚀形态的溶蚀饱和度及分形维数为溶蚀模式的判别提供了一个可行的准则。

为验证以上溶蚀模式形态学判别方法的合理性，统计了每种溶蚀模式下达到突破时（本文中裂隙渗透率增加 4 倍，即  $k=4k_0$  时为突破时刻）注入流量  $PV_{bt}$  变化规律，如图 4 (c) 所示，其中  $PV$ =注入流量体积/裂隙体积。可见，上文判别准则确定的“虫孔”溶蚀模式下的  $PV_{bt}$  最小，而紧凑溶蚀模式和均匀溶蚀模式对应的  $PV_{bt}$  都较大。并且随着  $Pe$  数的增大， $PV_{bt}$  呈现先减小后增大的趋势。由此可见，“虫孔”溶蚀对裂隙渗透性改变最显著，当形成“虫孔”溶蚀时，随着侵蚀的发展，裂隙渗透性将快速增大，这将严重影响水库大坝等工程的长期防渗安全。亦有大量研究证实“虫孔”溶蚀模式下相同注入流量时的渗透性变化最大<sup>[4]</sup>，与本文结果一致。综上所述，本节建立了基于分形维数  $D_f$ 、溶蚀饱和度  $S_w$  和突破流量  $PV_{bt}$  的综合判别方法，能够定量地判别不同的溶蚀模式。

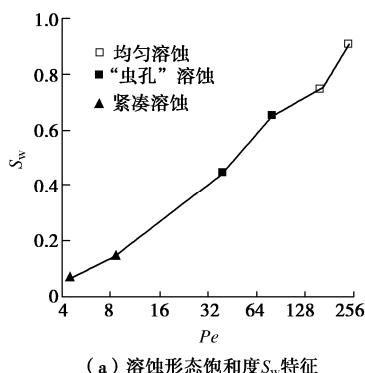
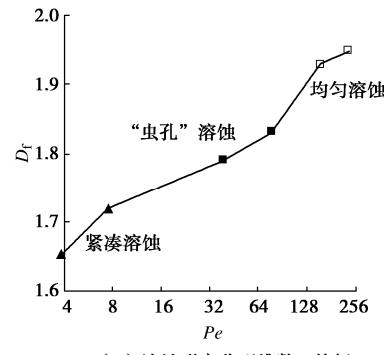
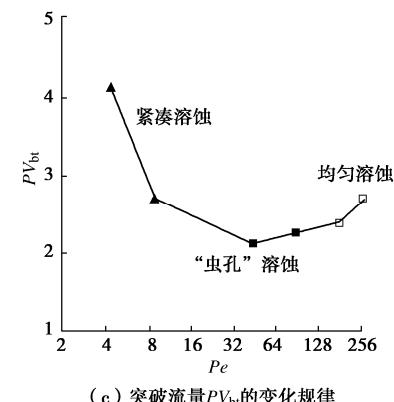
(a) 溶蚀形态饱和度  $S_w$  特征(b) 溶蚀形态分型维数  $D_f$  特征(c) 突破流量  $PV_{bt}$  的变化规律

图 4 裂隙开度随溶蚀时间的变化规律及溶蚀速率

Fig. 4 Evolution of aperture with erosion time and erosion rate

### 3.3 溶蚀模式转变的临界判据

试验结果表明随着可溶性流体注入流速逐渐增大，溶蚀模式逐渐从紧凑溶蚀发展到“虫孔”溶蚀，进而发展为均匀溶蚀。为了探究溶蚀模式转变的规律，基于以上试验的溶蚀形态转变特征，本节还统计了 3 种典型溶蚀模式的转变临界条件：紧凑溶蚀与“虫孔”溶蚀的边界发生在  $Pe \approx 10$ ,  $Da \approx 0.1$  ( $Da_{eff,L} \approx 10$ )，“虫孔”与均匀溶蚀的边界在  $Pe \approx 100$ ,  $Da \approx 0.01$  ( $Da_{eff,L} \approx 1$ )。计算径向穿透长度  $l_f$ ，并计算了其与裂隙长度  $R_0$  比值  $\gamma$ ，如表 1 所示，发现比值  $\gamma$  随着  $Pe$  的增加而逐渐增大，且紧凑溶蚀的  $\gamma$  值均小于 0.1，均匀溶蚀的  $\gamma$  值均大于 1，“虫孔”溶蚀的  $\gamma$  值介于 0.1~1。穿透长度  $l_f$  为溶蚀最前端的长度，当  $l_f$  远远小于  $R_0$ ，即  $\gamma < 1$  时，溶蚀将仅在入口附近，形成紧凑溶蚀；另一种情况， $\gamma > 1$  时，说明拥有溶蚀能力的溶液将瞬间抵达裂隙出口附近，从而造成全局均匀溶蚀；仅当  $\gamma$  值介于 0.1~1 之间时，溶蚀前端处于裂隙中段位置，形成拥有优势通道的“虫孔”溶蚀。综上， $\gamma \approx 0.1$  ( $Da_{eff,L} \approx 10$ ) 与  $\gamma \approx 1$  ( $Da_{eff,L} \approx 1$ ) 可作为紧凑溶蚀与“虫孔”溶蚀、“虫孔”溶蚀与均匀溶蚀的临界判据条件。值得指出的是，本文的理论判据未考虑溶蚀过程亦受裂隙本身性质（如裂隙粗糙度等）条件的影响，未来还将进一步展开对多复杂因素影响下的溶蚀模式的转变临界理论判据研究。

### 3.4 溶蚀过程中裂隙开度的变化规律

溶蚀过程导致裂隙开度的增加及开度分布的变

异, 将严重影响水库储水的密封性与坝基渗流的稳定性。本文统计了图3(a) (A~F)中溶蚀过程的开度平均值及标准差随溶蚀时间的变化曲线如图5(a), (b)所示。可见, 平均开度变化及其标准差都随着溶蚀的发育而逐渐变大。其中, 均匀溶蚀模式的开度变化斜率最大, 大于“虫孔”溶蚀, 紧凑溶蚀最小。定义此斜率为溶蚀速率 $r$ , 其与 $Pe$ 值的关系如图5(c)所示, 可见, 呈线性关系。此现象是由于形成从紧凑溶蚀到“虫孔”溶蚀再到均匀溶蚀, 其所需流速通常逐渐增大, 且试验中注入的皆为新鲜的非饱和NaCl溶液, 则在固定时间内, 总流量也越来越大, 造成的溶蚀量也逐渐增大。此外, 由于本试验中NaCl溶解过程溶解速率系数为常数<sup>[25]</sup>, 因而溶蚀速率 $r$ 与 $Pe$ 数(流速)亦呈现线性关系。

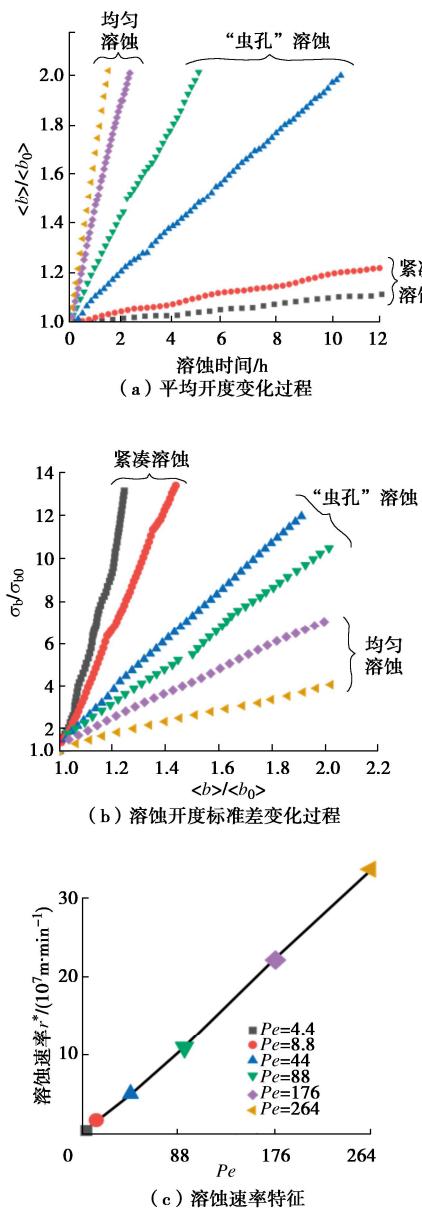


图5 裂隙渗透率随溶蚀时间的变化规律

Fig. 5 Evolution of permeability with erosion and erosion rate

反观溶蚀过程中裂隙开度变异性变化与裂隙开度变化的关系, 如图5(b)所示, 紧凑溶蚀的标准差变化最大, “虫孔”模式次之, 均匀溶蚀变化最小。考虑溶蚀过程3种模式的开度空间分布特征, 紧凑溶蚀开度变化区与未变化区开度分布差异最大, 而均匀溶蚀则全局溶蚀, 即开度分布差异保持最小的变化, “虫孔”模式介于两者之间, 这种开度分布的差异性符合3种溶蚀模式开度分布特征。

### 3.5 裂隙渗透性演化规律

溶蚀过程的宏观表现即为裂隙渗透性的增加。为进一步表征溶蚀过程开度变化对岩石渗透率的影响, 本文还统计了不同溶蚀模式下渗透率变化 $k/k_0$ 随开度变化 $b/b_0$ 的关系, 如图6所示。“虫孔”溶蚀模式下开度变化引起的渗透率变化最显著, 均匀溶蚀模式次之, 紧凑溶蚀模式开度变化引起渗透率变化最小。通常, 在径向流中, 立方定律同样存在, 通常描述为

$$Q = \frac{2\pi b^3}{12\mu \ln(r_0/R_0)} \Delta P \quad (11)$$

由式(11)可知, 径向流的立方定律中渗透率与开度的关系依然可以表述为 $k \cdot b^2$ 。据计算, 裂隙初始时刻渗透率 $k_0 = (7.28 \pm 0.3) \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 。图6中, 立方定律用粉色实线表示。

由图6可见, 3种溶蚀模式中渗透率与开度的关系明显偏离立方定律, 且“虫孔”溶蚀模式偏离的最显著。这种偏离现象在Detwiler等<sup>[7]</sup>的试验中亦被发现。例如, 在开度变化 $b/b_0$ 为200%时, 由立方定律得渗透率变化增加了4倍(粉色实线), 而均匀溶蚀模式(黄色, 对应图3(a)-F)的渗透率增加了约5倍, “虫孔”溶蚀(蓝色, 对应图3(a)-C)下渗透率增加了约8倍。此现象说明当“虫孔”形成时, 在平均开度增加相同的情况下, 优势通道的形成使主要通道内部的开度变化更显著, 从而显著增加渗透率。

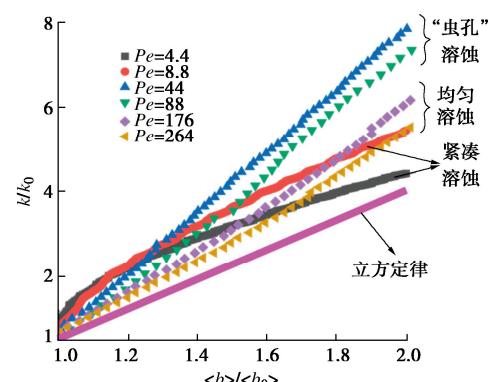


图6 裂隙渗透率随溶蚀时间的变化规律

Fig. 6 Evolution of permeability with erosion time

此外, 值得注意的是, 紧凑溶蚀(黑色和红色线)

在溶蚀刚开始阶段, 渗透性增加最为显著, 但随着溶蚀的进行, 裂隙渗透性增加逐渐减缓, 并逐渐弱于本试验的两组均匀溶蚀模式。这可能是因为紧凑溶蚀仅溶蚀了裂隙入口附近, 在本试验的径向流条件下, 入口附近的裂隙开度突然增大, 将使渗透性明显增大。然而, 由于后续“虫孔”溶蚀逐渐形成贯通性通道, “虫孔”溶蚀的渗透性增长则更为迅速。这进一步说明, “虫孔”溶蚀由于裂隙内物质传输速率和反应速率几乎达到均衡, 使得渗流和溶蚀形成了正反馈, 即更多的可溶性流体流入已形成的优势通道内, 溶蚀更多的NaCl晶体, 形成更具优势的通道, 促使更多可溶性流体流入, “虫孔”的开度进一步增大, 从而使渗透性增加最为显著且剧烈。

## 4 结 论

本文采用自主搭建的粗糙裂隙渗流-溶蚀耦合可视化试验平台, 开展了基于透明可溶粗糙裂隙的渗流-溶蚀可视化试验, 阐明了3种典型溶蚀模式溶蚀过程中开度、溶蚀形态特征、渗透性的变化规律, 建立了更为合理的考虑裂隙长度的溶蚀模式转变的临界条件, 将更精准地预测“虫孔”溶蚀模式的发生范围, 加深了对渗流-溶蚀过程中裂隙形态及渗透性演变规律的认识。

(1) 通过可视化试验观测随着流速的增加, 溶蚀模式从紧凑溶蚀转变为“虫孔”溶蚀, 进而转变为均匀溶蚀。

(2) 定义了考虑裂隙长度的有效Da数 $Da_{eff,L}$ , 确立了溶蚀模式从紧凑溶蚀向“虫孔”溶蚀, 进而向均匀溶蚀转变的临界转变条件分别为 $Da_{eff,L} \approx 10$ 与 $Da_{eff,L} \approx 1$ , 并得到了本文试验结果的验证。

(3) 渗流-溶蚀耦合作用使裂隙渗透率的变化规律不符合立方定律。在相同的开度变化时, “虫孔”溶蚀的渗透率增长最迅速, 并远远大于立方定律; “虫孔”溶蚀的所需突破流量最小。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 王婷参与实验设计; 王婷和何亚宁参与实验操作; 王婷、王子龙、何亚宁参与论文的写作和修改; 李炎隆提供研究经费支持。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。The study was designed by WANG Ting. The experimental operation was completed by WANG Ting and HE Yaning. The manuscript was drafted and revised by WANG Ting, WANG Zilong, HE Yaning; The research fund was supported by LI Yanlong. All authors have read the last version of paper and

consented for submission.

## 参 考 文 献:

- [1] DACCORD G, LENORMAND R, LIÉTARD O. Chemical dissolution of a porous medium by a reactive fluid: I. Model for the “wormholing” phenomenon[J]. Chemical Engineering Science, 1993, **48**(1): 169-178.
- [2] 霍吉祥, 宋汉周, 杜京浓, 等. 表面反应和扩散迁移联合控制的粗糙单裂隙渗流-溶解耦合模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(5): 1013-1021. (HUO Jixiang, SONG Hanzhou, DU Jingnong, et al. Coupled fluid flow and chemical dissolution model based on surface reaction and mass transfer control in a rough fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(5): 1013-1021. (in Chinese))
- [3] 盛金昌, 许孝臣, 姚德生, 等. 流固化学耦合作用下裂隙岩体渗透特性研究进展[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(7): 996-1006. (SHENG Jinchang, XU Xiaochen, YAO Desheng, et al. Advances in permeability evolution in fractured rocks during hydro-mechanical-chemical processes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(7): 996-1006. (in Chinese))
- [4] GOLFIER F, ZARCONE C, BAZIN B, et al. On the ability of a Darcy-scale model to capture wormhole formation during the dissolution of a porous medium[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, **457**(1): 213-254.
- [5] FREDD C N, FOGLER H S. Optimum conditions for wormhole formation in carbonate porous media: influence of transport and reaction[J]. SPE Journal, 1999, **4**(3): 196-205.
- [6] DETWILER R L, GLASS R J, BOURCIER W L. Experimental observations of fracture dissolution: the role of pecclet number on evolving aperture variability[J]. Geophysical Research Letters, 2003, **30**(12): 2003GL017396.
- [7] PEREIRA N J P, BLUNT M J, BIJELJIC B. Pore-scale simulation of carbonate dissolution in micro-CT images[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016, **121**(2): 558-576.
- [8] 申林方, 王志良, 曾叶, 等. 基于粗糙岩体裂隙表面反应的格子 Boltzmann 渗流-溶解耦合模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(8): 1615-1626. (SHEN Linfang, WANG Zhiliang, ZENG Ye, et al. A coupled seepage and dissolution model of rough rock fractures considering surface reaction based on lattice Boltzmann method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(8): 1615-1626. (in Chinese))
- [9] SZYMCZAK P, LADD A J C. Wormhole formation in dissolving fractures[J]. Journal of Geophysical Research:

- Solid Earth, 2009, **114**(B6): 2008JB006122.
- [10] STARCHENKO V, LADD A J C. The development of wormholes in laboratory-scale fractures: perspectives from three-dimensional simulations[J]. *Water Resources Research*, 2018, **54**(10): 7946-7959.
- [11] LADD A J C, SZYMCZAK P. Reactive flows in porous media: challenges in theoretical and numerical methods[J]. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 2021, **12**: 543-571.
- [12] XU L, SZYMCZAK P, TOUSSAINT R, et al. Dissolution phase diagram in radial geometry[J]. *Frontiers in Physics*, 2020, **8**: 369.
- [13] NOIRIEL C, DENG H. Evolution of planar fractures in limestone: the role of flow rate, mineral heterogeneity and local transport processes[J]. *Chemical Geology*, 2018, **497**: 100-114.
- [14] DACCORD G, LIÉTARD O, LENORMAND R. Chemical dissolution of a porous medium by a reactive fluid: II. Convection vs reaction, behavior diagram[J]. *Chemical Engineering Science*, 1993, **48**(1): 179-186.
- [15] OSSELIN F, KONDRAKIUK P, BUDEK A, et al. Microfluidic observation of the onset of reactive-infiltration instability in an analog fracture[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**(13): 6907-6915.
- [16] DETWILER R L, PRINGLE S E, GLASS R J. Measurement of fracture aperture fields using transmitted light: an evaluation of measurement errors and their influence on simulations of flow and transport through a single fracture[J]. *Water Resources Research*, 1999, **35**(9): 2605-2617.
- [17] CHEN Y F, FANG S, WU D S, et al. Visualizing and quantifying the crossover from capillary fingering to viscous fingering in a rough fracture[J]. *Water Resources Research*, 2017, **53**(9): 7756-7772.
- [18] SIMON B. Dissolution rates of NaCl and KCl in aqueous solution[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1981, **52**: 789-794.
- [19] ZHANG Y, XIE X, YANG Z K, et al. Study on the spectrum of photonic crystal cavity and its application in measuring the concentration of NaCl solution[J]. *Zeitschrift Für Naturforschung A*, 2017, **72**(4): 345-349.
- [20] WANG T, HU R, YANG Z B, et al. Transitions of dissolution patterns in rough fractures[J]. *Water Resources Research*, 2022, **58**(1): e2021WR030456.
- [21] PANGA M K R, ZIAUDDIN M, BALAKOTAIAH V. Two-scale continuum model for simulation of wormholes in carbonate acidization[J]. *AIChE Journal*, 2005, **51**(12): 3231-3248.
- [22] DENG H, FITTS J P, CRANDALL D, et al. Alterations of fractures in carbonate rocks by CO<sub>2</sub>-acidified brines[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(16): 10226-10234.
- [23] STEEFEL C I, DEPAOLO D J, LICHTNER P C. Reactive transport modeling: an essential tool and a new research approach for the Earth sciences[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **240**(3/4): 539-558.
- [24] KALIA N, BALAKOTAIAH V. Modeling and analysis of wormhole formation in reactive dissolution of carbonate rocks[J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, **62**(4): 919-928.
- [25] LICHTNER P C. The quasi-stationary state approximation to coupled mass transport and fluid-rock interaction in a porous medium[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, **52**(1): 143-165.
- [26] GRODZKI P, SZYMCZAK P. Reactive-infiltration instability in radial geometry: From dissolution fingers to star patterns[J]. *Physical Review E*, 2019, **100**(): 033108.
- [27] AHOULOU A W A, TINET A J, OLTÉAN C, et al. Experimental insights into the interplay between buoyancy, convection, and dissolution reaction[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, **125**(11): e2020JB020854.
- [28] WANG T, HU R, YANG Z B, et al. Reactive-infiltration instability in a Hele-Shaw cell influenced by initial aperture and flow rate[J]. *Physical Review Fluids*, 2023, **8**(4): 043901.
- [29] RODED R, PAREDES X, HOLTZMAN R. Reactive transport under stress: Permeability evolution in deformable porous media[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, **493**: 198-207.
- [30] NOIRIEL C, GOUZE P, MADÉ B. 3D analysis of geometry and flow changes in a limestone fracture during dissolution[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **486**: 211-223.
- [31] HU R, WANG T, YANG Z B, et al. Dissolution hotspots in fractures[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(20): e2021GL094118.
- [32] CHEN Y, MA G W, LI T, et al. Simulation of wormhole propagation in fractured carbonate rocks with unified pipe-network method[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, **98**: 58-68.