

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

### 重力条件下粗糙裂隙溶蚀过程的可视化试验研究

张子翼, 胡 冉, 廖 震, 陈益峰

## Visualization experimental investigation into the dissolution processes in rough fracture under gravity conditions

ZHANG Ziyi, HU Ran, LIAO Zhen, and CHEN Yifeng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202204044

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

## 不同赋存环境下碳酸盐岩溶蚀过程试验模拟研究

Experimental simulation of the carbonate dissolution process under different occurrence conditions 林云, 任华鑫, 武亚遵, 贾方建, 刘朋, 梁家乐 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 15-26

### 可溶岩化学溶蚀试验方法研究综述

Advances in the chemical dissolution methods of soluble rocks 郭静芸, 毕鑫涛, 方然可, 李守定 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 24-34

### 动态载荷下大理岩断口形貌特征试验研究

An experimental study of the fracture morphology of marble under dynamic loading 王伟祥, 王志亮, 贾帅龙, 卢志堂 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 118-124

### 裂隙宽度空间变异性和泄漏条件对网络裂隙中DNAPLs运移影响研究

Effects of spatial variability of fracture width and leakage conditions on the migration of DNAPLs in network fractures 常兴, 骆乾坤, 邓亚平, 马雷, 钱家忠 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 174–181

### 裂隙延展性统计分布离散性对岩体块体化程度REV的影响

Influence of statistical distribution dispersion in the fracture size on blockiness REV of fractured rock masses 夏露,谢娟,于青春 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 112–118

### 薄层灰岩浅部岩溶发育特征及分布模型

Development characteristics and distribution model of shallow karst in thin-bed limestones 张宽, 唐朝晖, 柴波, 孙巧, 张洁飞 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 167-174



关注微信公众号,获得更多资讯信息

### DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202204044

张子翼, 胡冉, 廖震, 等. 重力条件下粗糙裂隙溶蚀过程的可视化试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 178-188. ZHANG Ziyi, HU Ran, LIAO Zhen, *et al.* Visualization experimental investigation into the dissolution processes in rough fracture under gravity conditions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 178-188.

# 重力条件下粗糙裂隙溶蚀过程的可视化试验研究

张子翼<sup>1,2</sup>, 胡 冉<sup>1,2</sup>, 廖 震<sup>1,2</sup>, 陈益峰<sup>1,2</sup>

(1. 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;

2. 武汉大学水工岩石力学教育部重点实验室,湖北武汉 430072)

摘要: 岩体裂隙的溶蚀现象广泛存在于自然过程和工程实践,重力对溶蚀过程具有重要作用。可视化观测技术是研究粗糙裂隙溶蚀机理的关键手段,然而传统的可视化技术存在裂隙粗糙壁面难以复制、溶蚀过程难以实时观测等问题。通过自主研发的粗糙裂隙溶蚀过程可视化试验平台,开展了垂直裂隙和水平裂隙在4种流量条件(0.05,0.1,0.3,1 mL/min)下的溶蚀可视化实验,研究了重力效应对溶蚀模式和溶蚀形态的影响,采用分形维数量化了不同溶蚀模式的形态学特征,最终确定了不同佩克莱数(Pe)条件下的突破时注液量。试验结果表明:在Pe≤62.1范围内,重力效应对溶蚀模式具有重要影响,垂直裂隙中的溶蚀发育为浮力主导模式和通道模式,重力效应将诱发单一、集中的溶蚀通道;而水平裂隙则统一发育为开度演变均匀、宽度较大的通道,即经典的虫洞溶蚀模式;在Pe数较大时(Pe=207.0)时,垂直裂隙和水平裂隙中的溶蚀均发育为均匀溶蚀。试验结果还证实了垂直裂隙更易发育为贯通的溶蚀通道,从而加速溶蚀突破;Pe=20.7时为最优注入条件,垂直裂隙的突破时注液量最小。在此条件下,垂直裂隙的突破时注液量仅为水平裂隙的1/4。建议重点关注重力效应对溶蚀过程的影响,研究结果对CO₂地质封存等工程实践具有重要意义。

关键词:粗糙裂隙;重力效应;溶蚀形态;溶蚀模式;溶蚀通道;突破时注液量
中图分类号: 641.2
文献标志码: A
文章编号: 1000-3665(2023)02-0178-11

## Visualization experimental investigation into the dissolution processes in rough fracture under gravity conditions

ZHANG Ziyi<sup>1,2</sup>, HU Ran<sup>1,2</sup>, LIAO Zhen<sup>1,2</sup>, CHEN Yifeng<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan,
 Hubei 430072, China; 2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering of the Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** Dissolution of rock fractures is common in natural processes and engineering practices, in which gravity plays an important role. Visual observation technology is a key means to study the mechanism of dissolution in rough fractures. However, the traditional visualization technologies have some problems, such as difficult to reproduce the rough wall of fractures and difficult to observe the dissolution process in real time. In this work, a flow-visualization system for dissolution processes in rough fractures is developed, on which flow-through experiments are conducted on four flow rates (0.05, 0.1, 0.3, and 1 mL/min) for vertical and horizontal fractures,

收稿日期: 2022-04-19; 修订日期: 2022-09-24 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(52122905; 51988101; 51925906)

第一作者: 张子翼(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩体结构面溶蚀机理方面的研究。E-mail: 2015301580338@whu.edu.cn

通讯作者: 胡冉(1985-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土多相渗流理论与应用方面的研究工作。E-mail: whuran@whu.edu.cn

· 179 ·

and the gravity effect is evaluated on dissolution patterns and dissolution morphologies, which are characterized by fractal dimension and other morphological parameters. The pore volumes at breakthrough are calculated for each Peclet number (*Pe*). The experimental results show that the gravity effect significantly influences the dissolution patterns for  $Pe \le 62.1$ . The dissolution morphologies exhibit buoyancy-dominated patterns and channeling patterns for vertical fractures, and the gravity effect will induce a single and concentrated channel. For horizontal fractures, the dissolution forms dissolution channels with relatively uniform aperture evolution and large width, which are classical wormhole patterns. When the Peclet number is large (*Pe*=207.0), dissolution in both the vertical and horizontal fractures develops into uniform dissolution. The experimental results also confirm that the dissolution in vertical fractures is more likely to develop channels through the inlet to the outlet to accelerate the breakthrough; *Pe*=20.7 is the optimal injection condition, which means that the amount of injected liquid is the minimum when breakthrough takes place in vertical fractures. Under this condition, the pore volumes at breakthrough in vertical fractures are only 1/4 of the horizontal fractures. The results in this paper are of great significance to engineering practice such as CO<sub>2</sub> geological storage, indicating that the effect of gravity on the dissolution process should be greatly taken into account.

**Keywords**: rough fracture; gravity effect; dissolution morphology; dissolution pattern; dissolution channel; pore volumes at breakthrough

岩体裂隙广泛存在于岩层中,是地下水渗流及溶 质运移的主要通道。当流体具有反应活性时,渗流过 程将溶蚀裂隙中的方解石等可溶性矿物,改变粗糙裂 隙的开度分布甚至形成溶蚀通道,呈现出复杂的溶蚀 形态和溶蚀模式,最终决定了裂隙介质的宏观渗透特 性演化。粗糙裂隙的这种溶蚀现象广泛存在于自然 界和工程实践中<sup>[1]</sup>。溶蚀形态与溶蚀模式的研究,对 于岩溶地貌形成机理的认知<sup>[2-5]</sup>、可溶岩区高坝工程 长期防渗安全评估<sup>[6-10]</sup>、CO<sub>2</sub>地质封存安全性评价<sup>[11-14]</sup> 以及石油注酸开采<sup>[15-17]</sup>等具有重要意义。

本质上,粗糙裂隙的溶蚀过程受控于矿物的溶解 速率、溶液的对流和溶质的扩散这三者之间的相互作 用<sup>[18-21]</sup>。这种复杂的相互作用与诸多因素密切相关, 如介质的固有特性(如围压[22]、非均质性[23]、粗糙度[24]), 流动条件(如注入流速[25]、注入方式[26-27]、重力效应[28-37]) 和流体性质(如温度<sup>[38]</sup>、浓度<sup>[38]</sup>、液相分布<sup>[39-40]</sup>)等。 一般而言,溶蚀模式通常分为紧凑溶蚀、优势通道溶 蚀("虫洞"溶蚀)和均匀溶蚀3种模式。以往研究表 明[28-29],重力是影响溶蚀形态和溶蚀模式的一个重要 因素。由于温度和密度的变化,反应性流体的密度在 高程上存在一定的差异。在重力条件下,不同密度的 流体将形成浮力对流现象(自然对流),改变流场和溶 质的分布特征,进而影响溶蚀形态和溶蚀模式。自然 界中绝大多数的裂隙溶蚀现象发生于碳酸盐岩[4]。有 学者曾用碳酸盐岩[42]进行溶蚀试验,研究自然界中碳 酸盐岩体裂隙的溶蚀过程,发现气泡的产生较为缓

慢,且溶解于溶液,对渗流的影响不显著。因此,可将 固-液-气三相系统简化为固-液相变系统,岩盐<sup>[30-31]</sup>或 盐晶<sup>[27-28]</sup>这种不产生气泡的介质便成为室内试验研 究中被广泛采用的材料。另一方面,碳酸盐岩的反应 动力学特性与可溶性矿物的组成和空间分布特征密 切相关<sup>[23]</sup>,也是影响溶蚀机理的关键因素。

研究人员通过可视化试验及数值模拟方法,对重 力条件下裂隙溶蚀机理,展开了系列研究工作[28-34]。 Dijk 等[31] 通过核磁共振(MRI)技术研究重力效应对裂 隙溶蚀形态的影响,表明上裂隙面溶蚀速率显著大于 下裂隙面。Chaudhuri 等<sup>[32]</sup>则通过有限元数值模拟技 术,研究了在地热和压力驱动下,灰岩裂隙在垂直方 向上的溶蚀和浮力对流过程,确定了浮力对流的形成 条件,揭示了浮力对流条件下"狭长"溶蚀通道的形成 机制。Philippi 等<sup>[33]</sup> 通过晶体溶解试验和有限元数值 模拟,研究了溶蚀产生的浮力对流现象及其机理,并 围绕边界层的扰动提出了浮力对流的3种不同状 态。Hu 等<sup>[28]</sup> 通过粗糙裂隙可视化试验技术, 研究了 环形裂隙在径向流条件下的溶蚀现象及模式,发现了 重力效应产生的溶蚀热点新现象。针对重力效应对溶 蚀模式的影响,研究人员也开展了系列研究工作[34-37]。 Slim 等<sup>[34]</sup> 通过离子浓度可视化试验, 研究了平行板裂 隙的溶蚀模式,并归纳出溶蚀模式发展的六个阶段。 Snippe 等<sup>[35]</sup> 通过细观尺度数值模拟,研究了 CO,注入 碳酸岩裂隙介质后的水气两相溶蚀现象及模式转变 特征。Oltéan 等<sup>136]</sup>结合一维粗糙裂隙试验和数值模

拟,确定了垂直裂隙中溶蚀的4种模式,并依据佩克 莱数(Pe数)、达姆科勒数(Da数)和理查德森数(Ri 数)3个无量纲参数建立一维粗糙裂隙溶蚀模式相 图。该溶蚀模式相图也得到了Ahoulou等<sup>[37]</sup>关于垂直 裂隙溶蚀试验的验证。

上述研究深刻阐明了重力诱发的浮力对流机制 对溶蚀形态和溶蚀模式的关键影响。然而,由于粗糙 裂隙溶蚀可视化试验技术的制约,上述研究主要集中 于一维垂直粗糙裂隙<sup>[36]</sup>或填充玻璃珠的光滑垂直裂 隙<sup>[37]</sup>,难以反映岩体的粗糙壁面特征。在可视化试验 方面,上述研究往往基于 CT<sup>[24,42-43]</sup>或 MRI<sup>[30-31]</sup>重构 技术,难以实现溶蚀过程的实时动态观测。目前,重 力条件下粗糙裂隙溶蚀形态及溶蚀模式的研究,还不 够深入。

为此,本文研发了粗糙裂隙溶蚀过程可视化试验 技术,实现了垂直粗糙裂隙溶蚀过程的实时、动态以 及可重复观测,量化了水平和垂直条件下流速对溶蚀 形态特征和溶蚀模式的影响,揭示了重力效应对溶蚀 锋面稳定性、溶蚀通道以及溶蚀模式转变特征的影响 机制,阐明了重力条件下粗糙裂隙溶蚀突破注液量随 流速的变化规律。

## 1 材料和方法

### 1.1 可视化试验平台

为了实现粗糙裂隙溶蚀过程的实时、动态以及 可重复观测,在已有的多相渗流可视化平台的基础 上<sup>[44-46]</sup>,研发了粗糙裂隙溶蚀过程可视化试验平台 (图 1)。该平台由透明的可溶性粗糙裂隙模型、流量 控制系统、成像系统和数据采集系统组成,实物图如 图 1(c)所示。为了实现试验过程中稳定、高精度的流 体注入条件,流量控制系统采用 Harvard 注射泵,确保 了量程范围为 1.56~220 mL/min 的精确控制。为了获 取高精度的溶蚀形态图像,采用高性能 CCD 相机,达 到了全幅分辨率为 2 452×2 056@9.2 fps、空间分辨率 为 25 μm/pixel 的图像采集效果。





Fig. 1 Flow-visualization experimental set-up for fracture dissolution processes and fabrication of the fracture model

可溶性粗糙裂隙模型的制备是溶蚀可视化试验 的关键。与多相渗流不同,溶蚀属于破坏性试验,裂 隙模型在每次试验中仅能用一次。因此,确保所有裂 隙模型初始开度的一致性,是开展溶蚀研究的基础和 前提条件。为了实现这一目标,采用粗糙玻璃和光滑 NaCl晶体制备可溶性裂隙,如图1(b)所示。首先将

粗糙玻璃和 NaCl 晶体紧密贴合形成一个三维的裂隙 通道。其次,为了保证流体不发生泄漏,在裂隙通道 的上下表面各贴一层柔性 PVC 垫。然后,采用橡胶抵 压条紧贴裂隙通道侧边界并采用高强螺栓夹紧;采用 TLB-6 N·m 型定力矩扳手, 先将图 1(b)(c)所示的每 个螺栓拧至 0.6 N·m、静置 30 min 后重复操作,再拧 至 1.2 N·m、静置 30 min后重复操作,误差为 0.06 N·m。 上述试验操作可严格控制裂隙的初始开度。由于非 饱和的 NaCl 溶液仅能溶蚀光滑表面的 NaCl 晶体(粗 糙裂隙的一盘),而无法溶蚀粗糙玻璃(粗糙裂隙的另 一盘)。因此,经过上述步骤,便可制备出具有特定初 始开度分布的一系列裂隙样品。本文采用 NaCl 材料 开展试验研究,尽管这种透明材料与碳酸盐岩在反应 速率、晶系结构等理化性质方面存在差异,但是考虑 到本文的研究重点是重力条件下不同流速对溶蚀模 式及其形态特征的影响机制,故选取 NaCl 晶体这种 透光性较好、易于实现可视化观测的介质作为研究 对象。

为了确保每个试验模型初始开度一致,在试验前 采用高精度柱塞泵以 0.01 mL/min 的流量向裂隙中缓 慢注入高粘度甘油直至裂隙完全饱和,测得注入流体 体积稳定在 1.10~1.16 mL 之间,方可进行试验。考虑 到前述每个螺栓的力矩一定,盐晶与玻璃为刚性固 体,可认为每个模型的初始开度以及裂隙通道的形 状、厚度、均一性等性质均一致。

需要指出的是,裂隙溶蚀形态及其模式的尺度跨 越多个量级,从数百英里的洞穴系统<sup>[47]</sup> 到厘米尺度的 室内岩芯试验系统<sup>[27-28]</sup>,从野外溶蚀试验<sup>[48]</sup> 到室内溶 蚀试验均有涉及。这些研究表明裂隙溶蚀形态和 溶蚀模式由 Pe 数<sup>[25]</sup>、Da 数<sup>[19]</sup>等特征参数控制。本文 试验条件对应的 Pe 数变化范围为 10~207,与传统的 溶蚀机理研究处于类似的量级变化范围,具有一定的 代表性<sup>[49-51]</sup>。

#### 1.2 试验流程

采用质量浓度为 250 g/L 的不饱和 NaCl 溶液作为 反应性流体溶蚀粗糙裂隙。在试验之前, 配备两种质 量浓度的 NaCl 溶液, 一种为注入的反应性流体(质量 浓度为 250 g/L), 另一种为饱和 NaCl溶液(质量浓度 为 360 g/L)。为了精确捕捉溶蚀过程中开度改变引起 的光强改变, 向这两种溶液中添加亮蓝一号(FD&C Blue #1)固体粉末作为染色剂, 制成染色剂质量浓度 为 0.25 g/L 的染色溶液, 进而通过图像后处理技术精 确计算开度的改变值。经过上述准备后, 通过注射泵 A以定流量方式(10 mL/min)注入饱和 NaCl 溶液,并 持续5min,使得粗糙裂隙达到完全饱和状态。此时, 由于裂隙中的流体为饱和 NaCl 溶液,裂隙壁面(NaCl 晶体)不会发生溶蚀。为了确保系统达到平衡状态, 将试验系统静置15 min,随后,通过注射泵 B 以定流 量的方式(0.05, 0.1, 0.3, 1 mL/min)注入不饱和的 NaCl 溶液。在此过程中,注入的不饱和 NaCl 溶液将持续 溶蚀裂隙壁面,导致开度增加、流体厚度增加,进而诱 发透射光强发生改变。通过高精度 CCD 相机采集图 像,获取光强的变化特征,为开度演化特征的计算提 供试验原图。为了研究重力对裂隙溶蚀过程的影响, 开展在垂直裂隙和水平裂隙中的对照溶蚀试验:垂直 裂隙即倾角 90°的裂隙,流体从下往上注入,重力方向 与流动方向相反,流体在流动方向上受到重力的影 响;水平裂隙即倾角0°的裂隙,流体沿水平方向注入, 重力方向与流动方向垂直,流体在流动方向上不受重 力影响。上述试验过程中,温度保持在(25±0.5)°C; 分别对垂直和水平2组粗糙裂隙开展0.05,0.1,0.3, 1 mL/min 4组不同流量的溶蚀试验,共计 8 组(表 1)。 溶蚀过程本质上受控于反应、对流和扩散这3种效 应。在本研究中,随着流速的增加,对流和扩散效应 将发生显著改变。为了表征对流和扩散效应的相对 大小,引入经典的 $Pe = v(b_0)/D_m$ ,v为裂隙的平均流 速, 〈b<sub>0</sub>〉为裂隙初始平均开度, D<sub>m</sub>为扩散速率, 取 25 °C 时 NaCl 在水中的扩散速率  $D_m = 1.61 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。将裂 隙平均流速 v=O/(W(b<sub>0</sub>))代入上式,可得 Pe 数的表达 式为:

$$Pe = QW/D_{\rm m} \tag{1}$$

式中: W——裂隙的宽度/cm,本文中 W=5 cm; O——注入流量/(mL·min<sup>-1</sup>)。

裂防

	衣 I ロ	、短余件		
Table 1         Experimental conditions				
(°)	试验组	$Q/(\mathrm{mL}\cdot\mathrm{min}^{-1})$	Pe	
	V1	1	207.0	
90	V2	0.3	62.1	

90	V3	0.1	20.7
	V4	0.05	10.4
	H1	1	207.0
0	H2	0.3	62.1
0	Н3	0.1	20.7
	H4	0.05	10.4

如表1所示,在本试验中,Pe数的变化范围为 10.4~207.0,跨越了一个数量级。

为了检验每次试验裂隙初始开度的一致性,绘制

了 8 个模型的初始开度(b<sub>0</sub>)分布图(图 2)。如图 2(b) 所示,各组试验的初始开度分布基本一致,裂隙长 10 cm,宽 5 cm,平均开度 0.226 mm,标准差 0.089 mm, 孔隙体积 1.13 mL。结合前述保证开度一致的试验方 法,可认为本文对重力条件下溶蚀机理的试验研究具 有较好的可重复性。

1.3 图像后处理

为了精确刻画溶蚀过程中开度的演变,基于 Beer-Lambert 定律,对照相机采集得到的试验原图进行后处理。Beer-Lambert 定律表征了透射光强度与溶液染 色剂的浓度、介质厚度和衰减系数的关系:

$$I_{\rm d} = I_0 \exp(-kc_{\rm dye}b + \beta) \tag{2}$$

转换为

灰度图

式中: I<sub>0</sub>——LED 光源提供的稳定输出光强;

*I*<sub>d</sub>──经粗糙裂隙后的透射光强;







为了得到开度的演化特征,首先将 t 时刻的试验 原图进行裁剪、转化成灰度图,得到该时刻的灰度值  $I_{d,}$ (图 3)。基于式(2),将 t 时刻的灰度值  $I_{d,}$ 和初始时 刻的灰度值  $I_{d,0}$ 进行对比,可得到开度的改变值  $\Delta b$  为:

裁剪

$$\Delta b = \frac{\ln(I_{d,0}/I_{d,t})}{kc_{dye}} \tag{3}$$

其中, kc<sub>dye</sub>=1.1×10<sup>3</sup> m<sup>-1</sup>。

如图 3(e)(f)所示,溶蚀过程中 t 时刻的开度改变 值Δb的分布图较好反映了溶蚀的形态特征。本文后 续将重点讨论不同流速条件下重力效应对溶蚀形态 的影响。

## 2 试验结果

如前所述,在重力条件下,溶液的密度差将引起 流体的浮力对流现象,也称自然对流。这种重力效应 将对溶质的对流产生一定的影响,进而使得重力条件 下的溶蚀形态极为复杂。为了研究重力效应对溶蚀 形态的影响,图4对比了垂直和水平裂隙在不同注入 流量(Pe数)条件下溶蚀区域随时间(以注入多少个裂隙体积计)的推进过程。随着不饱和 NaCl 溶液的持续注入,裂隙壁面(NaCl 晶体)的溶蚀区域逐渐向出口端推进,其中最后一列为突破时刻的溶蚀形态及其相对应的注入溶液量。

一般而言,在大 Pe 数时(Pe≥207.0),强迫对流 (由边界流速导致)对溶质的迁移起到控制性作用<sup>[25]</sup>, 而在小 Pe 数条件下(Pe≤10.4),溶质的扩散以及重力 诱发的浮力对流占主导<sup>[19,36]</sup>。因此,垂直裂隙与水平 裂隙的溶蚀形态在大 Pe 数时(Pe≥207.0)差异较小,如 图 4(a)-V1 和图 4(b)-H1 所示,溶蚀过程均由强迫对 流主导。在中等 Pe 数时(10.4<Pe≤62.1),由于垂直裂 隙中浮力对流效应的影响,两者溶蚀形态存在显著差 异。如图 4(a)-V3 和图 4(b)-H3 所示,垂直裂隙的溶 蚀形态表现为细长、狭窄的溶蚀通道,而水平裂隙的 通道相对较宽,且在注入口附近存在溶蚀稳定区。上 述溶蚀形态在试样尺度上表现出不同的溶蚀模式。 随着流量的逐渐增加,溶蚀过程由扩散主导和浮力对



Fig. 4 Dissolution morphologies for rough fractures

流主导逐渐演变为强制对流主导;相应地,溶蚀模式 也发生相应的转变。对于垂直裂隙,在小Pe数时(Pe≤ 10.4), 溶蚀过程主要由浮力对流驱动, 如图 4(a)-V4 所示。在溶蚀发展初期(注液量为4~8),溶蚀通道曲 折,部分溶蚀通道的发育方向垂直于主流动方向;而 在溶蚀发育后期,溶蚀通道分成两个分支。这种溶蚀 过程表现为浮力主导模式。当Pe数增加至20.7~62.1 时,强制对流和浮力对流共同控制溶蚀过程,而扩 散效应处于次要地位,由于这两种对流的主方向为垂 直向上,因此导致侵蚀形态呈现细直的垂直通道,如 图 4(a)-V2、V3 所示,称为典型的通道溶蚀模式。当 Pe 数进一步增加至 207.0 时, 如图 4(a)-V1 所示, 溶蚀 形态相对均匀分布,没有形成溶蚀通道,为典型的均 匀溶蚀模式。由此可见,在垂直裂隙中,由于重力诱 发的浮力对流效应,随着注入流量的增加,溶蚀模式 由浮力主导模式,转变为通道溶蚀模式,最终转变为 均匀溶蚀模式。

与垂直裂隙不同,由于浮力对流效应消失,对于 水平裂隙(NaCl晶体)而言,溶蚀过程仅受扩散和强制 对流的影响,如图 4(b)所示。在本试验中,水平裂隙 的溶蚀模式可分为两种,分别是中低 Pe 数时(Pe≤ 62.1)的虫洞溶蚀模式和大 Pe 数时(Pe=207.0)的均匀 溶蚀模式。在小Pe数时(Pe=10.4),注入流速极小,溶 质的运移由扩散主导。因此,在试验过程中,非饱和 NaCl 溶液"来不及"扩散至裂隙空腔内, 便在入口处发 生了溶解,进而导致入口处出现了稳定的溶蚀现象, 如图 4(b)-H4的1~3列所示。然而,随着溶蚀过程的 持续发展,溶蚀开始出现"虫洞"现象。如图 4(b)-H4的4~5列所示,占优的虫洞持续发育直至突破。 这种占优"虫洞"的发育,抑制劣势虫洞的生长,直至 后者被溶蚀稳定区湮没。这种"虫洞"现象也存在于 Pe 数为 20.7、62.1的流量条件, 即图 4(b)-H3 和图 4(b)-H2。然而,在大 Pe 数时(Pe=207.0, H1),裂隙中的溶 蚀较为均匀地分布在整个裂隙面上。这种均匀溶蚀 模式,与垂直裂隙中的溶蚀模式(V1)类似,表明强制 对流占主导,使得不饱和 NaCl 溶液相对均匀地分布 在裂隙平面,导致粗糙裂隙表面发生均匀地溶解。由 此可见,重力条件下溶蚀模式的转变,受到 Pe 数的显 著影响。在小Pe数条件下,重力诱发的浮力对流将 显著改变溶蚀模式。对于大 Pe 数,强迫对流占主导, 重力效应可以忽略。

### 3 分析与讨论

### 3.1 重力效应对溶蚀形态特征的影响

为了量化不同溶蚀模式的形态学特征,采用分形 维数表征水平和垂直裂隙中溶蚀模式随 Pe数的变 化。对于分形维数的计算,首先将注液量为20时的 溶蚀形态图,即图4(a)第5列和图4(b)第2列,转换 为二值图,然后采用 MATLAB 内置 Fraclab 工具箱计 算其分形维数(D<sub>f</sub>)。如图5所示,垂直裂隙中,浮力主 导的溶蚀模式,其D<sub>f</sub>最小,为1.62,而通道溶蚀模式 的D<sub>f</sub>为1.67~1.7。当Pe数增加至207.0时,D<sub>f</sub>增至 1.8。这表明,当溶蚀模式由浮力主导转变至通道以及 均匀溶蚀时,D<sub>f</sub>逐步增加。D<sub>f</sub>随Pe数的变化规律,也 适用于水平裂隙。然而,在本文所考虑的Pe数范围 内,垂直裂隙中溶蚀模式的D<sub>f</sub>均小于水平裂隙,表明 重力效应对溶蚀锋面具有显著的"失稳效应"。这一 失稳效应在垂直平行板溶蚀试验中也得到了证实行 板溶蚀试验中也得到了证实<sup>[38]</sup>。

为了更直观表征重力效应对溶蚀形态特征的影响,图6给出了溶蚀前后开度变化的横向分布曲线。 该分布基于注液量为20时刻的开度变化数据,统计 主流方向(y)开度改变的平均值<Δb>,随 y 的变化特



图 5 注液量为 20 时粗糙裂隙溶蚀形态的分形维数随 Pe 的变化 特征

### Fig. 5 Variation of fractal dimensions with the Peclet number for distribution of aperture growth when 20 pore volume of brine is injected

征。<Δb>,表征了壁面溶蚀在垂直于主流方向上的不 均匀程度。在大 Pe 数条件下(Pe=207.0),垂直裂隙和 水平裂隙的<Δb>,随着 y 的变化特征类似,没有出现 典型的波峰特征。这表明对于均匀溶蚀模式,裂隙的 溶蚀在 y 方向上基本保持一致(图 6 ),没有出现典型 的通道特征,重力效应可以忽略。

如图 6 所示, 在小 Pe 数下(Pe=10.4), 由于重力效应显著, 垂直裂隙的溶蚀呈现浮力主导模式。裂隙的



图 6 注液量为 20 时, <Δ*b*>, 随 y 的变化特征及其相对应开度变 化云图

Fig. 6 Variation of  $\langle \Delta b \rangle_y$  with y and corresponding aperture alternation colormaps when 20 pore volume of brine is injected

横向平均开度变化曲线呈单峰分布(方框1)。由图 6 (c)中的垂直裂隙云图可知,溶蚀集中于裂隙中部(方 框1),发育为单一的溶蚀通道,通道中开度的平均增量 为<Δb>=0.22 mm。对于水平裂隙,溶蚀发育为虫洞溶 蚀模式,<Δb>,曲线呈现双峰分布特征,对应两个溶蚀 通道(方框2、3),其平均增量分别为0.14 mm 和0.11 mm。

在中等 Pe 数条件下(Pe=20.7),尽管重力效应的 影响开始减弱,但是在垂直条件下< $\Delta b$ >,曲线仍呈现 峰值较大(< $\Delta b$ >,=0.38 mm)的单峰分布特征,对应于贯 通入口至出口的溶蚀通道,如图 6 (b)中的方框 4 所示。 在水平条件下,< $\Delta b$ >,与小 Pe 数时一致,也呈现了双 峰值特征(方框 5、6),但是平均增量均小于垂直裂隙。

综上所述,在中小 Pe 数条件下,无论是浮力主导 溶蚀模式还是通道溶蚀模式,重力效应都将诱发单一 的、更为集中(<Δb>,峰值较大)的溶蚀通道。

为了进一步研究不同 Pe 数、不同重力条件下溶 蚀对裂隙形态特征的影响,本文引入半变异函数 y 来 描述裂隙的空间变异性,并将 y 除以裂隙初始开度方  $差\sigma_b^2$ 以标准化,该分布基于注液量为 20 时的开度数据 (图 7)。在小 Pe 数下 (Pe=10.4),垂直裂隙的半变异 函数在全尺度上均增幅较大,可达 250%,说明其内部 形成了尺度不一的周期性溶蚀通道,而在中等 Pe 数 下 (Pe=20.7),垂直裂隙的半变异函数在小尺度下 (y  $\leq$  0.1 cm)增幅并不明显 (y=0.01 cm 时仅增大 35%),而在 大尺度下 (y  $\geq$  1 cm)增幅较大,可达 120%,说明此时裂



Fig. 7 Transverse semivariance of the fracture aperture

隙中只存在单一的大尺度通道。在大 Pe 数下(Pe= 207.0),垂直裂隙的空间变异性在全尺度上增幅较大, 说明重力条件下的均匀溶蚀模式仍会形成尺度不一 的侵蚀通道。对于水平裂隙,在中等和小 Pe 数下,其 半变异函数均减小,稳定区的推进使原有通道被 湮没,而虫洞尚未充分发展,故空间变异性下降。大 Pe 数下其空间变异性基本保持不变,是无重力条件下 均匀溶蚀的特性,与经典的溶蚀试验相吻合<sup>[23]</sup>。

3.2 重力效应对突破时注液量影响

溶蚀突破时的注液量(pore volume at breakthrough, PVBT),是量化溶蚀诱发流体泄漏风险和注酸提高油 气采收率的关键性指标。如前所述,重力效应对溶蚀 前锋具有显著的失稳效应<sup>[37]</sup>,在中低流量条件下诱发 单一集中的溶蚀通道。这种重力效应的影响,最终改 变 PVBT。图 8 给出了 PVBT 随 Pe 数的变化特征,其 溶蚀形态对应于图 4 最后一列。如图所示,对于垂直 裂隙,在小 Pe 数条件下(Pe=10.4),浮力对流占主导, 溶蚀通道曲折发育且有横向生长的趋势,导致近入口 处溶蚀通道较宽,具有溶解活性的非 NaCl溶液未被充 分用以纵向通道的发育,故突破时注液量较大。而当 Pe 数较大时(Pe≥62.1),溶蚀模式趋向于均匀溶蚀, 非饱和 NaCl 溶液均匀分布于裂隙,裂隙出口处的溶 液仍处于非饱和状态(具有化学活性),导致注入流体 没有充分利用,PVBT 相应增大。





只有在中间 Pe 数时(Pe=20.6),裂隙 PVBT 达到 最小值。此时裂隙溶蚀形态呈现为通道模式,对应的 Pe 数也称为最优 Pe 数<sup>[15,43]</sup>,具有化学活性的反应流体 最大效率地用于形成单一溶蚀通道。由图 8 可见,此 时 PVBT 仅为 13.2,而当 Pe=10.4 和 62.1 时, PVBT 分 别增至 27.1 和 16.6, 增量达 104% 和 25%。在水平裂 隙中, PVBT 随 Pe 数的增大而减小。其原因是, 随着 注入流速的增加, 非饱和 NaCl 溶液更容易与靠近出 口端的裂隙壁面发生溶解, 进而使得更容易发生突破。

由图8进一步可知, PVBT 在垂直条件下显著低 于水平裂隙。在本文考虑的 Pe 数范围内(10.4≤Pe≤ 207.0), 垂直裂隙 PVBT 只占水平裂隙的 24%~57%。 尤其是在最优 Pe 数时(Pe=20.6),由于重力诱发浮力 对流作用,垂直裂隙 PVBT 仅为水平裂隙的四分之 一。这一试验结果对 CO, 泄漏风险评估[41] 和注酸提 高采收率优化具有重要意义。在 CO, 地质封存工程 中,构造性断层或断裂,一般具有较大倾角。当CO2 注入后,酸化水将溶蚀断层中的可溶性矿物,而重力 诱发的浮力对流作用将增加 CO2 泄漏的可能性。同 样,在注酸开采过程中,注入井附近的反应性流体在 浮力作用下,将显著改变溶蚀特性。然而,目前关于 溶蚀机理的研究,往往基于水平条件下的岩芯注酸试 验,重力效应往往得不到深入研究。由本文试验结果 可知,在最优 Pe 数附近,重力效应对 PVBT 具有显著 影响,需要在试验和数值模拟中予以重点关注。

### 4 结论与展望

(1)在中小Pe数条件下(Pe≤62.1),由于浮力对 流机制,重力效应对溶蚀模式具有重要影响。垂直粗 糙裂隙在小Pe数发育为浮力主导模式,在中等Pe数 (20.7≤Pe≤62.1)发育为通道溶蚀模式;水平裂隙在中 小Pe数(Pe≤62.1)时均发育为虫洞溶蚀模式。在大 流速条件下(Pe=207.0)重力效应的影响可以忽略,两 种裂隙均发育为均匀溶蚀模式。

(2)在中小 Pe 数条件下,重力效应都将诱发单一、集中的溶蚀通道;而水平裂隙在垂直于主流方向上的发育,表现为开度演变较均匀、通道宽度较大的特征。

(3)受重力效应的影响,垂直裂隙的溶蚀过程更容易发生突破,其突破时注液量只占水平裂隙的24%~ 57%。特别地,当垂直裂隙发育为通道溶蚀模式时 (*Pe*=20.7),突破时注液量仅为水平裂隙的四分之一。 这表明在 CO<sub>2</sub>泄漏风险评估和注酸提高采收率等工 程实践中,需要考虑重力效应的影响。

### 参考文献(References):

[1] 陈崇希. 岩溶管道-裂隙-孔隙三重空隙介质地下水 流模型及模拟方法研究[J]. 地球科学, 1995, 20(4): 361 - 366. [ CHEN Chongxi. Groundwater flow model and simulation method in triple media of karstic tubefissure-pore[J]. Earth Science, 1995, 20(4): 361 - 366.(in Chinese with English abstract) ]

- [2] 陈旺光,曾成,龚效宇,等.贵州深切峡谷区典型岩溶 地下河水文水化学特征——以贵州三塘地下河为例
  [J].水文地质工程地质,2022,49(4):19-29.[CHEN Wangguang, ZENG Cheng, GONG Xiaoyu, et al. Hydrological and hydrochemical regime of a typical subterraneous river in a deep canyon Karst area: A case study in the Santang underground river, Guizhou[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 19 – 29. (in Chinese with English abstract)]
- [3] ZHANG Cheng, WORAKUL M, WANG Jinliang, et al. Hydrogeochemical features of Karst in the western Thailand[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2014(2): 18 – 26.
- [4] 陈友智,姜伏伟,于宁,等. 湘渝黔红色岩溶地貌形成的地质条件及成因分析[J/OL]. 地球化学. (2021-11-15)[2022-09-24].https://doi.org/10.19700/j.0379-1726.2021.04.009. [CHEN Youzhi, JIANG Fuwei, YU Ning, et al. Analysis on the geological conditions and genesis of red karst landform in Hu'nan-Chongqing-Guizhou[J]. Geochimica. (2021-11-15)[2022-09-24]. (in Chinese with English abstract)]
- [5] LI Sanbai, KANG Zhijiang, FENG Xiating, et al. Threedimensional hydrochemical model for dissolutional growth of fractures in Karst aquifers[J]. Water Resources Research, 2020, 56(3): e2019WR025631.
- [6] 钟祖良,高国富,刘新荣,等.地下采动下含深大裂隙 岩溶山体变形响应特征[J].水文地质工程地质,2020, 47(4):97-106. [ZHONG Zuliang, GAO Guofu, LIU Xinrong, et al. Deformation response characteristics of Karst Mountains with deep and large fissures under the condition of underground mining[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4):97-106. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 李向全,马剑飞,张春潮,等.川藏铁路格聂山和察雅 段构造岩溶发育规律及岩溶地下水循环模式研究[J]. 水文地质工程地质,2021,48(5):34-45. [LI Xiangquan, MA Jianfei, ZHANG Chunchao, et al. Evolution regularity of the plateau tectonic karst and the relevant karst groundwater circulation mode in Mount Genie and Zaya sections along the Sichuan— Xizang railway[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 34 – 45. (in Chinese with English abstract)]

- [8] 张良喜,赵其华,胡相波,等.某地区白云岩室内溶蚀 试验及微观溶蚀机理研究[J].工程地质学报,2012, 20(4):576-584. [ZHANG Liangxi, ZHAO Qihua, HU Xiangbo, et al. Laboratory dissolution test on dolomite and its micro-dissolution mechanism[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(4): 576 - 584. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张强.金沙江观音岩电站红层钙质砂岩类岩溶发育 特征及渗透稳定性研究[D].成都:成都理工大学, 2010. [ZHANG Qiang. Semi-Karst development characteristics and engineering seepage stability of the calcareous sandstone red beds of Guanyinyan hydropower, Jinsha River[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 刘海燕,伍法权,祁生文,等. 三峡库区泥质灰岩溶蚀 作用与边坡岩体破坏[J].煤田地质与勘探,2006,34(4): 37-41. [LIU Haiyan, WU Faquan, QI Shengwen, et al. The dissolution process and the rock mass breakage of marlite slope in Three Gorges Reservoir Region[J]. Coal Geology & Exploration, 2006, 34(4): 37-41. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 马瑾. 地质封存条件下超临界二氧化碳运移规律研究[D]. 北京:清华大学, 2013. [MA Jin. Researches on the migration of supercritical CO<sub>2</sub> on geological storage conditions[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [12] ELKHOURY J E, AMELI P, DETWILER R L. Dissolution and deformation in fractured carbonates caused by flow of CO<sub>2</sub>-rich brine under reservoir conditions[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, 16: S203 – S215.
- [13] CARROLL S A, IYER J, WALSH S D C. Influence of chemical, mechanical, and transport processes on wellbore leakage from geologic CO<sub>2</sub> storage reservoirs[J].
   Accounts of Chemical Research, 2017, 50(8): 1829 1837.
- [14] ZHANG Liwei, WANG Yan, MIAO Xiuxiu, et al. Geochemistry in geologic CO<sub>2</sub> utilization and storage: A brief review[J]. Advances in Geo-Energy Research, 2019, 3(3): 304 – 313.
- [15] 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.
- [16] HUANG Zhaoqin, XING Hongchuan, ZHOU Xu, et al.

Numerical study of vug effects on acid-rock reactive flow in carbonate reservoirs[J]. Advances in Geo-Energy Research, 2020, 4(4): 448 – 459.

- [17] KIANI S, JAFARI S, APOURVARI S N, et al. Simulation study of wormhole formation and propagation during matrix acidizing of carbonate reservoirs using a novel insitu generated hydrochloric acid[J]. Advances in Geo-Energy Research, 2021, 5(1): 64 – 74.
- [18] 武亚遵,林云,万军伟,等.碳酸盐岩单裂隙渗流-溶蚀 耦合模型及其参数敏感性分析[J].中国岩溶,2016, 35(1):81-86. [WU Yazun, LIN Yun, WAN Junwei, et al. Coupled fluid flow and dissolution model and associated parameter sensitivity analysis in a single carbonate rock fracture[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(1):81-86. (in Chinese with English abstract)]
- [19] SZYMCZAK P, LADD A J C. Wormhole formation in dissolving fractures[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114; B06203.
- [20] SZYMCZAK P, LADD A J C. Reactive-infiltration instabilities in rocks. Fracture dissolution[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2012, 702: 239 – 264.
- [21] 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.
- [22] DETWILER R L. Experimental observations of deformation caused by mineral dissolution in variableaperture fractures[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2008, 113: B08202.
- [23] MENKE H P, REYNOLDS C A, ANDREW M G, et al.
   4D multi-scale imaging of reactive flow in carbonates: Assessing the impact of heterogeneity on dissolution regimes using streamlines at multiple length scales[J].
   Chemical Geology, 2018, 481: 27 – 37.
- [24] DENG Hang, MOLINS S, TREBOTICH D, et al. Porescale numerical investigation of the impacts of surface roughness: Upscaling of reaction rates in rough fractures[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2018, 239: 374 – 389.
- [25] DETWILER R L, GLASS R J, BOURCIER W L. Experimental observations of fracture dissolution: The role of Peclet number on evolving aperture variability[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(12): 1648.
- [26] XU Le, SZYMCZAK P, TOUSSAINT R, et al. Dissolution phase diagram in radial geometry [J]. Frontiers in Physics, 2020, 8: 369.

- [27] WANG Ting, HU Ran, YANG Zhibing, et al. Transitions of dissolution patterns in rough fractures[J]. Water Resources Research, 2022, 58: e2021WR030456.
- [28] HU Ran, WANG Ting, YANG Zhibing, et al. Dissolution hotspots in fractures[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48: e2021GL094118.
- [29] BOUQUAIN J, MEHEUST Y, DAVY P. Horizontal preasymptotic solute transport in a plane fracture with significant density contrasts[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2011, 120-121: 184 – 197.
- [30] DIJK P E, BERKOWITZ B. Buoyancy-driven dissolution enhancement in rock fractures[J]. Geology, 2000, 28(11): 1051 – 1054.
- [31] DIJK P E, BERKOWITZ B, YECHIELI Y. Measurement and analysis of dissolution patterns in rock fractures[J]. Water Resources Research, 2002, 38(2): 1013.
- [32] CHAUDHURI A, RAJARAM H, VISWANATHAN H, et al. Buoyant convection resulting from dissolution and permeability growth in vertical limestone fractures[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(3): L03401.
- [33] PHILIPPI J, BERHANU M, DERR J, et al. Solutal convection induced by dissolution[J]. Physical Review Fluids, 2019, 4(10): 103801.
- [34] SLIM A C, BANDI M M, MILLER J C, et al. Dissolutiondriven convection in a hele-shaw cell[J]. Physics of Fluids, 2013, 25(2): 024101.
- [35] SNIPPE J, GDANSKI R, OTT H. Multiphase modelling of wormhole formation in carbonates by the injection of CO<sub>2</sub>[J]. Energy Procedia, 2017, 114: 2972 – 2984.
- [36] OLTÉAN C, GOLFIER F, BUÈS M A. Numerical and experimental investigation of buoyancy-driven dissolution in vertical fracture[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2013, 118(5): 2038 – 2048.
- [37] 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.
- [38] DETWILER R L, RAJARAM H. Predicting dissolution patterns in variable aperture fractures: Evaluation of an enhanced depth-averaged computational model[J]. Water Resources Research, 2007, 43: W04403.
- [39] DETWILER R L. Permeability alteration due to mineral dissolution in partially saturated fractures[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(B9): B09210.
- [40] XU Le, SZYMCZAK P, TOUSSAINT R, et al.

Experimental observation of dissolution finger growth in radial geometry[J]. Frontiers in Physics, 2019, 7: 96.

- [41] 林云,任华鑫,武亚遵,等.不同赋存环境下碳酸盐岩溶蚀过程试验模拟研究[J].水文地质工程地质,2021,48(2):15-26. [LIN Yun, REN Huaxin, WU Yazun, et al. Experimental simulation of the carbonate dissolution process under different occurrence conditions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2):15-26. (in Chinese with English abstract)]
- [42] DENG Hang, 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.
- [43] MCDUFF D, JACKSON S, SHUCHART C, et al. Understanding wormholes in carbonates: Unprecedented experimental scale and 3D visualization[J]. Journal of Petroleum Technology, 2010, 62(10): 78 - 81.
- [44] 胡冉,陈益峰,万嘉敏,等.超临界CO<sub>2</sub>-水两相流与CO<sub>2</sub>毛细捕获:微观孔隙模型实验与数值模拟研究[J].力学学报,2017,49(3):638-648.[HURan,CHEN Yifeng, WAN Jiamin, et al. Supercritical CO<sub>2</sub>-water displacements and CO<sub>2</sub> capillary trapping: Micromodel experiment and numerical simulation[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(3):638-648. (in Chinese with English abstract)]
- [45] 魏鹳举,胡冉,廖震,等.湿润性对孔隙介质两相渗流 驱替效率的影响[J]. 力学学报, 2021, 53(4): 1008 – 1017. [WEI Guanju, HU Ran, LIAO Zhen, et al. Effects of wettability on displacement efficiency of two-phase flow in porous media[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(4): 1008 – 1017. (in Chinese with English abstract)]

- [46] CHEN Yifeng, FANG Shu, WU Dongsheng, 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.
- [47] FORD D C, WILLIAMS P. Karst hydrogeology and geomorphology[M]. Chichester: Wiley, 2007.
- [48] 郭静芸,毕鑫涛,方然可,等.可溶岩化学溶蚀试验方法研究综述[J].水文地质工程地质,2020,47(4):24-34. [GUO Jingyun, BI Xintao, FANG Ranke, et al. Advances in the chemical dissolution methods of soluble rocks[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4):24-34. (in Chinese with English abstract)]
- [49] SZYMCZAK P, LADD A J C. Interacting length scales in the reactive-infiltration instability[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(12): 3036 – 3041.
- [50] 朱欣月,李三百,冯夏庭,等.基于数值法的三维缝洞 溶蚀演化主控因素研究[J].中国岩溶,2021,40(6):
  943 951. [ZHU Xinyue, LI Sanbai, FENG Xiating, et al. Numerical investigation on the main controlling factors of the dissolution evolution of three-dimensional fracture-cavity reservoirs[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(6):
  943 951. (in Chinese with English abstract)]
- [51] 余逍逍,史文兵,王小明,等.基于数字图像处理技术的溶蚀岩体细观变形破坏机制模拟研究[J].中国岩溶,2020,39(3):409 416. [YU Xiaoxiao, SHI Wenbing, WANG Xiaoming, et al. Simulation on mesoscopic deformation and failure mechanism of dissolved rock mass using digital image processing technology[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(3): 409 416. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华 刘真真