

不同倾角岩体裂隙溶蚀模式与渗透率演化规律

李 凯^{1,2}, 胡 冉^{1,2}, 张亚楠^{1,2}, 杨志兵^{1,2}, 陈益峰^{1,2}

(1. 武汉大学 水资源工程与调度全国重点实验室, 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: 岩体裂隙中反应性流体渗流诱发的溶蚀过程对岩土工程安全具有重要影响, 而由溶液密度差异所诱发的重力效应下, 倾斜裂隙介质的溶蚀机制尚不明确。通过孔隙尺度数值模拟与可视化试验相结合的方法, 系统探究了不同倾角裂隙溶蚀模式及渗透率演化规律。结果表明: 倾斜裂隙溶蚀过程中, 溶液密度差异诱发的浮力对流会形成“漩涡”流动结构, 其中沿裂隙长度方向的浮力对流主导溶蚀通道发育, 而垂直方向影响可忽略。通过引入理查森数建立了溶蚀模式判据: 当理查森数 $R_{ii} > 10$ 时属浮力对流主导模式, 倾角增大促进虫洞发育并降低突破注液量; 当理查森数 $R_{ii} \leq 10$ 时属强制对流主导模式, 其溶蚀形态由注入流速控制, 呈现紧凑溶蚀、虫洞溶蚀和均匀溶蚀 3 种模式。在此基础上, 建立了考虑重力效应的最佳注入流速的理论模型, 实现不同倾角下裂隙介质最佳注入流速的准确预测。研究成果为可溶岩区地下工程渗流控制提供了理论依据, 对 CO_2 地质封存、地浸采矿等工程的安全评估具有重要指导意义。

关 键 词: 浮力对流效应; 倾斜裂隙; 溶蚀模式; 渗透率演化; 最佳注入流速

中图分类号: TU451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2026)03-0993-14

Dissolution patterns and permeability evolution of rock fractures with different inclination angles

LI Kai^{1,2}, HU Ran^{1,2}, ZHANG Ya-nan^{1,2}, YANG Zhi-bing^{1,2}, CHEN Yi-feng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, 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: The dissolution process induced by reactive fluid flow in rock fractures significantly impacts geotechnical engineering safety, while the dissolution mechanisms of inclined fractures under gravitational effects induced by solution density differences remain unclear. This study systematically investigates the dissolution patterns and permeability evolution of fractures with different inclinations through pore-scale numerical simulations and visualization experiments. Results indicate that buoyancy-driven convection caused by solution density differences generates “vortex-like” flow structures during inclined fracture dissolution, where buoyancy convection along the fracture length dominates channel development, whereas gravitational effects in the vertical direction can be negligible. A criterion for the transition of dissolution patterns was established using the Richardson number (R_{ii}): When $R_{ii} > 10$ (buoyancy-dominated regime), increased inclination promotes wormhole growth and reduces the required injection volume for breakthrough; when $R_{ii} \leq 10$ (forced convection-dominated regime), dissolution patterns are governed by injection velocity, manifesting as compact dissolution, wormhole dissolution, or uniform dissolution. A theoretical model for optimal injection velocity incorporating gravitational effects was developed, enabling accurate predictions across varying inclinations. This research provides a theoretical guidance for seepage control in underground engineering within soluble rock formations and offers critical insights for safety assessments in CO_2 geological storage, in-situ leaching mining, and related applications.

Keywords: buoyancy convection effect; inclined fractures; dissolution pattern; permeability evolution; optimal injection flow rate

1 引 言

岩体裂隙广泛存在于岩层中, 构成主要导水通

道^[1]。当反应性流体流经裂隙时, 裂隙渗流将溶蚀壁面可溶性矿物, 增加裂隙开度。裂隙开度的演变在宏观尺度上形成不同的溶蚀形态^[2-5], 最终控制着

收稿日期: 2025-03-13

录用日期: 2025-04-28

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (A 类) (No.52525906); 国家自然科学基金面上项目 (No.52379107)。

This work was supported by the National Science Foundation for Distinguished Young Scholars (A) (52525906) and the General Program of National Natural Science Foundation of China (52379107).

第一作者简介: 李凯, 男, 1997 年生, 博士, 博士后, 主要从事裂隙介质溶蚀机制及数值模拟方法研究。E-mail: whukaili@whu.edu.cn

通信作者: 胡冉, 男, 1985 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水工岩体多相渗流与侵蚀方面的教学与研究工作。E-mail: whuran@whu.edu.cn

渗透率的演化特征^[6-7]。这种反应性裂隙渗流及其诱发的渗透率演变是诸多自然环境和地下工程中的关键过程,例如岩溶地貌形成机制^[8-10]、地下水污染物迁移的风险评估^[11]、CO₂ 的地质封存安全性评价^[12]、注酸石油气强化开采^[13]以及可溶岩区坝基的防渗安全评估^[14-17]。

裂隙溶蚀形态通常分为紧凑溶蚀、虫洞溶蚀和均匀溶蚀模式。溶蚀形态的形成受到流体对流、溶质扩散以及岩体表面反应动力学之间相互作用的控制,这些过程可以通过 Péclet 数 (Pe) 和 Damköhler 数 (Da) 来量化^[18-21]。在小 Pe 数和大 Da 数下,溶质的运输由扩散主导,反应性溶液流动速度较低,且在裂隙入口附近被完全消耗,此时溶蚀形态表现为紧凑溶蚀模式。其主要特征为:裂隙入口开度迅速增大,而裂隙下游的可溶性矿物不受溶蚀作用。当 Pe 数很大且 Da 数较小时,溶质的运输由强制对流主导,裂隙各处反应性溶液的活性相差不大,导致裂隙整体均匀溶蚀。以上两种溶蚀模式下的渗透率增长效率较低。在中等 Pe 数下,由于溶蚀前沿不稳定性自发形成的溶蚀通道相互竞争,其中一部分溶蚀通道在“正反馈机制”的作用下快速发育成为优势溶蚀通道,并抑制其他溶蚀通道的发育^[19]。此时溶蚀形态表现为虫洞溶蚀模式,注入相同体积的反应性溶液时能最大程度地提高裂隙渗透性^[13, 22]。除流速和反应速率外,重力效应(即在溶液具有密度差的情况下,重力引起的浮力对流效应)^[23-24]、矿物非均质性^[25]和围压条件^[26-28]等因素对溶蚀形态也有一定影响。然而,以往裂隙溶蚀研究往往未考虑温度或浓度变化引起的溶液密度变化,重力效应下的裂隙溶蚀研究尚不够系统和完善。

重力效应下的裂隙溶蚀研究对盐穴发育^[29]、原位浸出^[30]、CO₂ 的地质封存等自然现象和工程应用^[31-33]具有重要意义。当反应性流体溶蚀裂隙基质时,溶液的密度因溶质浓度变化而发生改变。如果裂隙壁面附近高浓度溶液中的溶质来不及扩散而形成浓度边界层,且该边界层厚度达到临界厚度时,重力效应将诱发浮力对流(自然对流)不稳定现象^[34-35],与瑞利-贝纳德对流不稳定类似。重力效应对裂隙溶蚀过程具有重要的影响,使得溶液浓度分布变得更加复杂,进而显著影响局部溶蚀速率和溶蚀形态^[23, 36]。在水平裂隙溶蚀过程中,重力效应会增大上裂隙面的溶蚀速度,同时抑制下裂隙的溶蚀^[23, 37]。浮力对流与强制对流的相互作用会导致裂隙中出现万花筒状流动结构,进而产生扇贝状和沟槽状的溶蚀形态^[23, 38-39]。在环形裂隙径向流溶蚀试

验中,这种相互作用会导致“溶蚀热点”现象的产生^[24]。因此,除 Pe 数和 Da 数外,重力效应下的裂隙溶蚀过程分析中还应使用 Rayleigh 数 (Ra) 或 Richardson 数 (Ri) 来量化浮力对流的强度^[23, 34-35]。

近年来, Hu 等^[23]开展了不同 Pe 数和 Ra 数下的水平裂隙溶蚀研究,并使用 Ri 量化浮力对流和强制对流的相互作用,阐明了重力诱发对称性破坏的现象及其成因,划分了 3 种主导模式,表明在浮力对流主导模式下重力效应会抑制虫洞的发展。在垂直裂隙溶蚀研究中, Oltéan 等^[40]研究了不同 Pe 数、 Da 数和 Ri 数下的二维垂直光滑裂隙溶蚀过程,划分了 4 种主导模式,并表明在浮力对流主导溶蚀模式下,重力效应引起的浮力对流会使溶蚀速度随裂隙高度的增加而增加。Ahoulou 等^[41]开展了垂直放置的二维多孔介质溶蚀试验,强调了浮力对流在溶蚀过程的重要作用。张子翼^[42]、Li^[43]等开展了垂直粗糙裂隙溶蚀研究,发现小 Pe 数下重力效应会引发漩涡流动结构,促进狭长虫洞的发育^[43]。

然而,现场条件下的裂隙通常并不是完全水平或者垂直的,而是具有一定的倾角。在倾斜裂隙溶蚀过程中,垂直于裂隙平面方向上的重力效应会抑制虫洞的发育,而沿裂隙长度方向的重力效应会促进虫洞的发展。目前,重力效应下不同倾角裂隙溶蚀的相关研究,还不够深入。因此亟需开展相关试验或模拟,探讨裂隙倾角变化对溶蚀形态和渗透率演化特征的影响。

本文采用考虑溶液密度变化的孔隙尺度模拟方法,研究重力效应下倾斜裂隙溶蚀过程,并通过裂隙渗流溶蚀可视化试验验证该方法的有效性和合理性。在此基础上,通过开展大量不同流速和倾角条件下裂隙渗流溶蚀过程模拟,研究了重力效应下倾角改变对裂隙溶蚀形态和流线分布的影响,揭示了倾斜裂隙溶蚀中漩涡产生的机制。依据考虑倾角变化的理查森数划分了两种主导模式,进一步建立了重力效应下倾斜裂隙溶蚀模式理论判据。最后,阐明了倾角增加对裂隙渗透率演化特征的影响,研究了倾角增加对裂隙溶蚀突破时注液量的影响,并通过理论分析确定了不同倾角下的最佳注入流速。

2 裂隙溶蚀孔隙尺度模拟方法

2.1 微观连续介质方法

本文使用考虑溶液密度变化的孔隙尺度模拟方法,对裂隙溶蚀过程进行数值模拟研究。该模拟方法以微观连续介质方法为基础,使用 ε_f 代表控制体积内空隙的体积分数。蓝色部分 ($\varepsilon_f=1$) 表示裂

隙空隙, 红色部分 ($\varepsilon_f = 0$) 表示固体基质, 见图 1。流动-溶蚀过程中的所有物理变量都在一个控制体积内进行平均, 并使用一个动量方程来描述整个计算域内空隙和固体基质中溶液的流动状态。当 $\varepsilon_f = 1$ 时, 动量方程转变为 Navier-Stokes 方程, 用于描述空隙中的流体流动。 $\varepsilon_f = 0$ 表示固体占据了整个控制体积, 且没有流体流动。 $0 < \varepsilon_f < 1$ 表示控制体积中存在固-液界面, 动量方程转变为 Darcy 方程, 控制体积中固-液界面的面积用 a_v 表示。

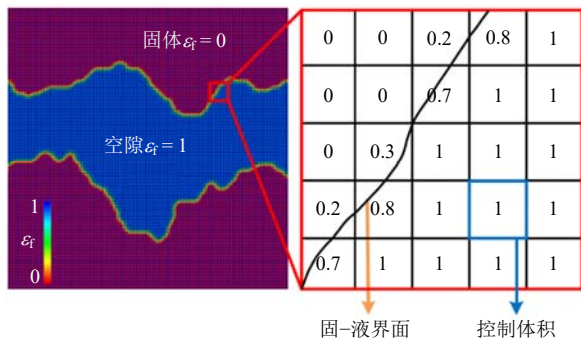


图 1 孔隙尺度模拟方法示意图

Fig.1 Schematic of the pore-scale modeling approach

2.2 考虑溶液密度变化的渗流-溶蚀控制方程

整个计算域 (空隙和多孔介质区域) 中的流体流动通过用达西-布林克曼-斯托克斯方程 (Darcy-Brinkman-Stokes, 简称 DBS 方程) 描述。为再现裂隙溶蚀过程中的重力效应, 本研究在 DBS 方程中考虑了溶液密度随浓度的变化。采用 Boussinesq 近似以降低求解难度, 即动量守恒方程中仅考虑密度变化对浮力项的影响, 忽略密度变化对惯性项、压力梯度项和黏性项的影响。因此, 考虑到重力效应的动量守恒方程可以写为

$$\frac{1}{\varepsilon_f} \left(\frac{\partial \bar{\mathbf{v}}}{\partial t} + \nabla \cdot \frac{1}{\varepsilon_f} \bar{\mathbf{v}} \right) = \frac{\rho_f}{\rho_0} \mathbf{g} - \nabla \bar{p} + \frac{\nu_f}{\varepsilon_f} \nabla^2 \bar{\mathbf{v}} - \nu_f k^{-1} \bar{\mathbf{v}} \quad (1)$$

式中: $\bar{p}$ 和 $\bar{\mathbf{v}}$ 分别为控制体积中的平均运动压力和平均速度, $\bar{p} = (1/V_f) \int_{V_f} p_f dV$, $\bar{\mathbf{v}} = (1/V) \int_{V_f} \mathbf{v} dV$, V_f 为控制单元中的流体体积, V 为整个控制单元的体积, p_f 为溶液压力, $\mathbf{v}$ 为流速; ρ_f 为溶液密度; ρ_0 为注入的不饱和溶液的初始密度; ν_f 为运动黏度; k 为控制体积的局部渗透率; $\mathbf{g}$ 为重力加速度。需要指出的是, 为避免分母中的体积分数 $\varepsilon_f = 0$, 实际数值模拟过程中将固体基质视为孔隙率趋近于 0 的多孔介质 ($\varepsilon_f = 0.001$), 此时固体基质中几乎没有流体流动^[18]。控制体积的局部渗透率 k 与体积分数 ε_f 之间的关系采用 Kozeny-Carman 方程进行描述,

$k^{-1} = k_0^{-1} (1 - \varepsilon_f)^2 / \varepsilon_f^3$, k_0 为模拟中设定的初始参数。严格来说, Boussinesq 近似应满足相对密度差不超过 1% 的条件^[44]。然而, 以往研究表明, 相对密度差的上限可以放宽至 10%^[45]。本研究中, 非饱和溶液与饱和溶液之间最大的相对密度差为 4.6%, 因此采用 Boussinesq 近似来进行简化是合理的。

假设溶液浓度 $\bar{c}$ 和溶液密度 ρ_f 之间存在线性关系:

$$\rho_f = \rho_0 [1 + \beta_0 (\bar{c} - \bar{c}_0)] \quad (2)$$

式中: $\bar{c}$ 为控制体积中的平均归一化溶质质量浓度, $\bar{c} = (1/V_f) \int_{V_f} c/c_{\text{sat}} dV$, c 为控制体积中的溶质平均质量浓度, c_{sat} 为饱和溶液的质量浓度; $\beta_0 = d\rho_f/d\rho_0 d\bar{c} = (\rho_{\text{sat}} - \rho_0)/\rho_0 (1 - \bar{c}_0)$, 下标 “0” 和 “sat” 分别表示非饱和状态 (流入的流体) 和饱和状态。

在溶蚀过程中, 裂隙形貌的演变由固相的质量守恒方程控制:

$$\frac{\partial \varepsilon_s \rho_s}{\partial t} = -\dot{m} \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_s = 1 - \varepsilon_f$, 为控制体积中固体的体积分数; ρ_s 为固体的密度; $\dot{m}$ 为固体的溶蚀速率。本研究采用一阶反应动力学模型, 该模型能够较好地描述重力效应下 NaCl 晶体的溶蚀过程^[46]:

$$\dot{m} = a_v k_s c_{\text{sat}} (1 - \bar{c}) \quad (4)$$

式中: k_s 为反应速度常数; a_v 为一个控制体积中的固-液界面面积, $a_v = 4\varepsilon_f (1 - \varepsilon_f) \|\nabla \varepsilon_f\|$ ^[29]。

不可压缩流体的连续性方程可写为

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{v}} = \dot{m} (1/\rho_f - 1/\rho_s) \quad (5)$$

随着固体矿物溶解到流体中, 溶液浓度增加。溶液浓度也受到流体流动 (平流和扩散) 的影响。因此, 溶质的质量守恒方程可以写为

$$\frac{\partial \varepsilon_f \bar{c}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{v}} \bar{c}) = \nabla \cdot (\varepsilon_f^2 D_m \nabla \bar{c}) + \dot{m} \quad (6)$$

式中: D_m 为分子扩散系数。本文通过开源模拟平台 OpenFOAM 对该孔隙尺度模拟方法进行数值实现, 控制方程采用有限体积法进行离散^[23], 求解器及相关算例可在 GitHub 网站下载 (<https://github.com/whufLOW/dissolGravityFoam>)。

3 数值模拟与试验对比研究

3.1 粗糙裂隙溶蚀可视化试验

为验证该孔隙尺度模拟方法的有效性和可信性, 本节对重力效应下粗糙裂隙溶蚀试验进行数值

模拟。试验过程概述如下, 详细的试验方法及步骤见张子翼等^[42]的研究。试验装置由透明的可溶性粗糙裂隙模型、注射泵 (Harvard Apparatus, 70-3007)、CCD 相机 (AVT, Manta-201) 和数据分析系统组成, 见图 2(a)。可溶性裂隙模型由不可溶的粗糙玻璃与可溶的光滑氯化钠晶体紧密贴合而成, 见图 2(b)。裂隙模型通过高强度螺栓固定于金属框架上, 结合密封条与 PVC 垫片, 有效防止渗漏。在裂隙的进出口两端设置了长方体缓冲腔, 用于均匀分布流体, 减小入口扰动对流场的影响。共设计 2 组裂隙模型, 分别为倾角为 0° 的水平裂隙和倾角为 90° 的垂直裂隙。对于水平裂隙模型, 氯化钠晶体置于粗糙玻璃下方。首先向粗糙裂隙中注入饱和 NaCl 溶液 (浓度 $c_{\text{sat}} = 317 \text{ kg/m}^3$) 使其达到饱和状态, 并采用光投射技术对裂隙的开度分布进行测量。图 2(c) 给出了

粗糙裂隙的初始开度分布, 其中裂隙长度 $L = 10 \text{ cm}$, 宽度 $W = 5 \text{ cm}$, 平均开度 $b_0 = 0.226 \text{ mm}$, 开度标准差 $\sigma_b = 0.089 \text{ mm}$ 。随后, 以恒定流量的方式注入不饱和 NaCl 溶液 (浓度 $c_0 = 229 \text{ kg/m}^3$)。试验中, 分别使用水平裂隙和垂直裂隙模型开展 4 组不同注入流量下的渗流溶蚀试验 (流量 Q 分别为 0.05 、 0.10 、 0.30 、 1.00 mL/min)。注入的 NaCl 溶液中含有亮蓝一号 (FD&C Blue #1) 染色剂, 当氯化钠晶体溶解后, 裂隙的开度和透射光强度会发生改变。通过高精度 CCD 相机记录溶蚀过程, 并采集图像数据以获取光强的变化特征。基于修正的比尔-朗伯定律 (Beer-Lambert Law), 可通过初始状态 $I_0(d)$ 和当前状态 $I_t(c)$ 下透射光强度的变化来计算裂隙开度变化场 Δb , 其计算公式为 $\Delta b = \ln(I_0/I_t)/k_c$, k_c 为常数, $k_c = 1000$ 。

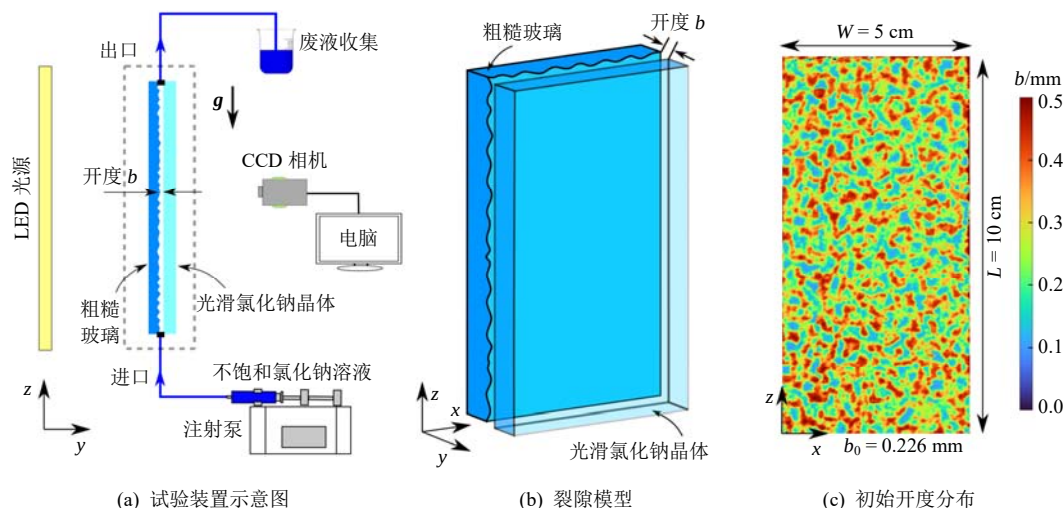


图 2 裂隙溶蚀试验装置示意图

Fig.2 Schematic of the experimental setup for fracture dissolution

3.2 试验与数值模拟对比

本节将试验和数值模拟结果进行对比, 以评估孔隙尺度模拟方法的可靠性, 并分析重力效应对溶蚀过程的影响。根据图 2 中的裂隙模型和开度分布构建了三维粗糙裂隙模型, 并依据试验条件开展了 8 组裂隙溶蚀模拟。数值模拟所用参数均严格依据试验条件设定, 溶蚀相关参数见表 1。模拟运行前, 将计算区域内的流体初始化为与试验条件一致的静态饱和 NaCl 溶液 ($c = c_{\text{sat}}$)。入口设置为恒定流量边界条件, 出口设置为恒定压力边界条件, 其他边界设置为无滑移边界条件。数值模拟中的裂隙模型网格尺寸为 $\Delta x = \Delta z = 0.175 \text{ mm}$, $\Delta y = 0.044 \text{ mm}$, 每个裂隙模型的网格单元数量约为 300×10^4 , 需 32 核并行计算。Péclet 数 (Pe) 用于表征对流速度和扩

表 1 数值模拟参数

Table 1 Numerical simulation parameters

参数	数值	物理意义
k_s	$1.52 \times 10^{-4} \text{ m/s}$	反应速度常数
D_m	$1.58 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	分子扩散系数
ρ_s	2165 kg/m^3	NaCl 晶体密度
ρ_{sat}	1198 kg/m^3	饱和 NaCl 溶液密度
ρ_0	1145.3 kg/m^3	注入不饱和 NaCl 溶液密度
c_{sat}	317 kg/m^3	饱和 NaCl 溶液的浓度
c_0	229 kg/m^3	注入不饱和 NaCl 溶液浓度
μ_f	$1.63 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	动力粘度
k_0	10^{-15} m^2	局部渗透率参数

散速度的相对大小, Damköhler 数 (Da) 用于表示反应速度与对流速度的相对大小:

$$Pe = \frac{u_0 b_0}{D_m} \quad (7)$$

$$Da = \frac{k_s}{u_0} \quad (8)$$

式中: u_0 为裂隙进口平均流速, $u_0 = Q/(Wb_0)$; $k_s = 0.004\ 89\ c_0^{-0.639} = 1.52 \times 10^{-4}\ \text{m/s}$ [46]。

图3给出了不同时刻下试验和数值模拟的溶蚀形态(开度变化分布 Δb)以及平均开度演化,水平裂隙溶蚀中分别对应注入10 PV和20 PV不饱和溶液时的溶蚀形态,垂直裂隙溶蚀中分别对应注入8 PV和20 PV不饱和溶液时的溶蚀形态,其中PV为裂隙空隙的初始体积($PV = b_0 LW$)。水平裂隙溶蚀试验中(见图3(a)),裂隙溶蚀在小流速条件下($Pe = 10.5$)表现为紧凑溶蚀模式,裂隙溶蚀集中在裂隙入口附近,溶蚀前沿较为稳定。随着流速的增加,溶蚀前沿的不稳定性增强,流体流动和矿物溶蚀之间的正反馈机制导致优势溶蚀通道的出现,裂隙溶蚀形态从紧凑溶蚀转变虫洞溶蚀(Pe 分别为21, 63, 210)。水平裂隙溶蚀的数值模拟也表现出相同的溶蚀形态转变规律,且溶蚀形态与试验结果相似。而在垂直裂隙溶蚀试验中(见图3(b)),不同流速下的裂隙溶蚀形态均呈现虫洞溶蚀模式。其原因是重力效应诱发裂隙长度方向上(即图2中的 z 方向)的浮力对流,促进了狭长溶蚀通道的发育。考虑重力效应的垂直裂隙溶蚀模拟结果与试验观察的溶蚀形态也较为相似。试验结果与模拟中溶蚀形态的差异主要源自浮力对流引起的流场不稳定性,这类非线性混沌行为在当前模拟中仍难以完全刻画。以上不同倾角和流速条件下的8组裂隙溶蚀试验充分展示溶蚀形态随倾角和流速变化的显著趋势,能够有效验证模拟方法。

为了定量比较试验与模拟结果,图3中也给出了试验和模拟中裂隙平均开度的变化。在大流速下($Pe = 21 \sim 210$),试验与模拟中裂隙平均开度的演化趋势较为一致。需要指出的是,在小流速下($Pe = 10.5$),模拟结果中的平均开度增长较快。其原因可能是本文使用了一阶反应动力学模型和恒定的反应速度常数,导致溶蚀速率被高估。在真实条件下,反应速度常数会随着溶液浓度的增加而降低,且NaCl晶体在不饱和溶液中的溶解速度呈非线性变化,溶液接近饱和时溶蚀速率会急剧下降。反之,在大流速下,由于整个裂隙中的溶液浓度与初始浓度 c_0 几乎一致,因此使用一阶反应动力学模型和恒定反应速度常数带来的误差较小。此外,非线性反应动力学会增大溶蚀前沿的渗透长度,导致水平裂隙溶蚀模拟中的溶蚀前沿长度比试验中的更小。

总体而言,尽管数值模拟结果和试验结果存在

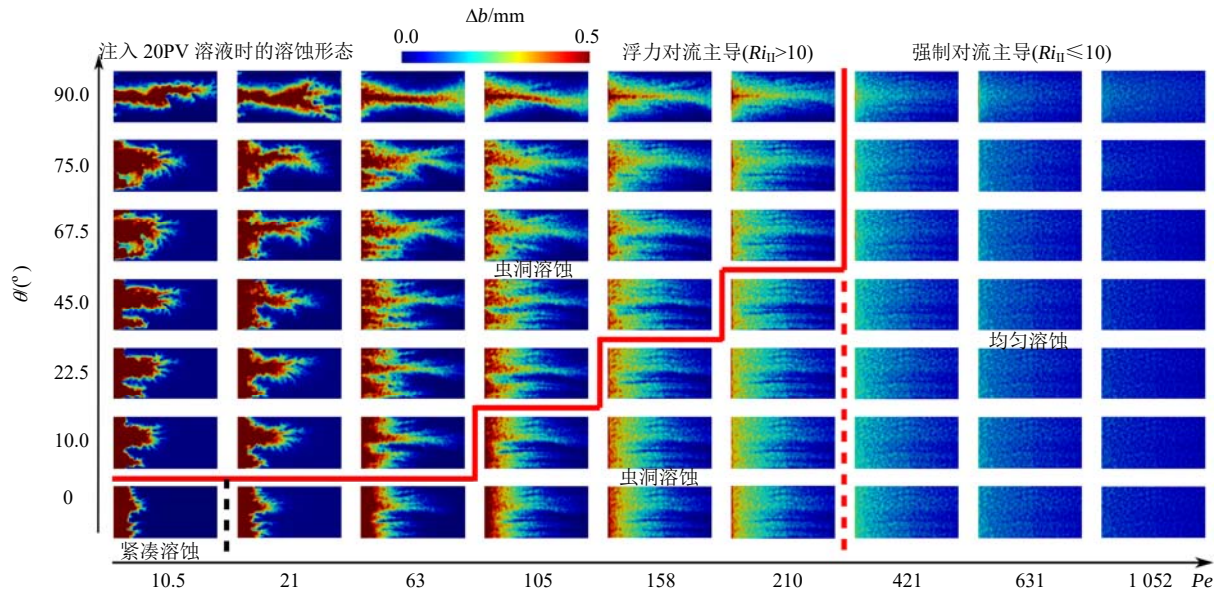
一定差异,但溶蚀形态的模拟结果与试验观测整体一致,很好地再现了倾角与流速变化引起的溶蚀形态演化趋势。模拟结果成功反映了重力效应对垂直裂隙中溶蚀通道发育的促进作用,验证了模拟方法刻画重力效应下裂隙渗流溶蚀过程的合理性与有效性。同时,以上分析表明重力效应对溶蚀过程的影响不仅仅取决于密度差导致的浮力对流,而是由浮力对流与强制对流之间的相互作用控制。在验证数值模拟方法可靠性之后,本文将重点通过模拟手段揭示不同倾角裂隙中的溶蚀模式与渗透率演化规律。

4 结果与讨论

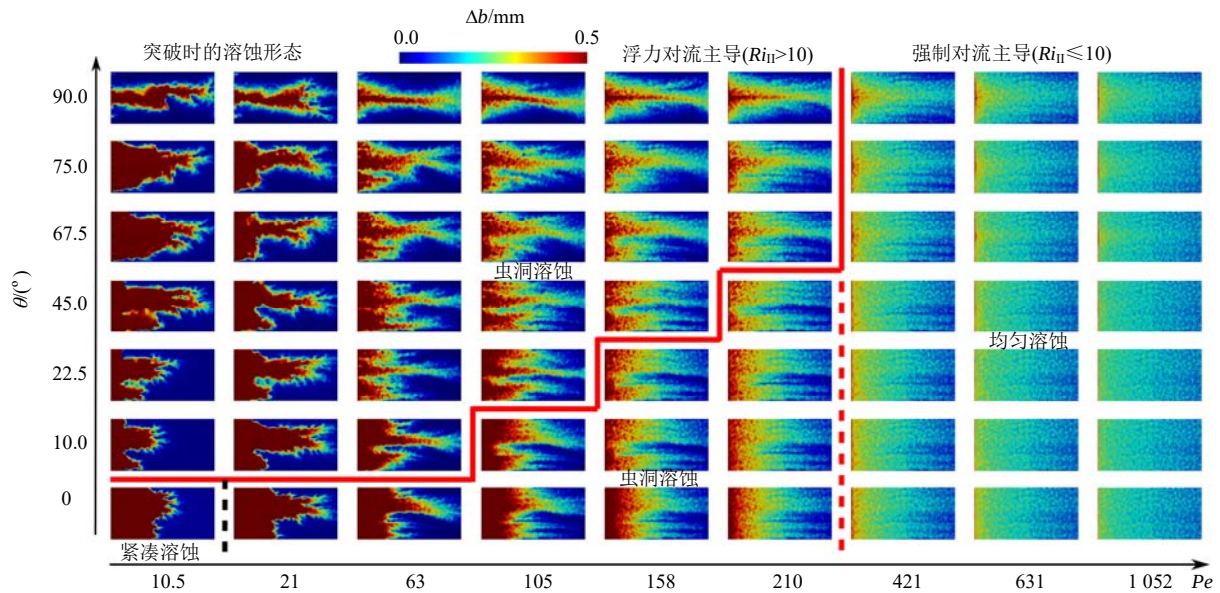
4.1 溶蚀模式及流线

基于上述数值模拟方法,本节探究不同倾角 θ 和流速 Pe 下粗糙裂隙溶蚀模式。本研究设置7组不同倾角(θ 分别为 0.0° 、 10.0° 、 22.5° 、 45.0° 、 67.5° 、 75.0° 、 90.0°)和9组不同流速(Pe 分别为10.5、21.0、63.0、105.0、658.0、210.0、421.0、631.0、1 052.0),其他模拟参数见表1。图4给出了注入20 PV不饱和溶液时和突破时的粗糙裂隙溶蚀形态。需要注意的是,受计算成本和时间限制,对于 θ 分别为 0.0° 、 10.0° 、 22.5° 情况下 $Pe = 10.5$ 的数值模拟并未计算到裂隙突破时刻。图4(b)所展示的溶蚀形态分别对应注入80 PV、25 PV和25 PV不饱和溶液时的状态。由图可知,在低 Pe 数($Pe = 10.5$)且 $\theta = 0^\circ$ 时,裂隙溶蚀形态呈现紧凑溶蚀模式。随着裂隙倾角的增加,裂隙长度方向上(即图2中的 z 方向)的浮力对流强度增大($g \sin \theta$ 变大),而垂直于裂隙平面方向上(即图2中的 y 方向)的重力效应减小($g \cos \theta$ 变小),裂隙溶蚀前沿不稳定性增强,溶蚀形态转变为虫洞溶蚀模式。在中等 Pe 数下($Pe = 21 \sim 210$),所有倾角下溶蚀前沿均表现出明显的不稳定性,溶蚀形态呈现虫洞溶蚀模式。此时,在相同 Pe 数下,随着倾角的增加,裂隙溶蚀通道(即虫洞)发展更为迅速,虫洞长度更长。在大流速下($Pe = 421 \sim 1\ 052$),倾角增加不会改变裂隙溶蚀形态,溶蚀形态都表现为均匀溶蚀。其原因是强制对流强度相对较大,重力效应对溶蚀过程几乎没有影响。总体而言,随着裂隙倾角的增加,裂隙长度方向上的浮力对流强度增大,进而促进虫洞的发育。然而,在大流速条件下,强制对流占据主导,倾角增加对裂隙溶蚀形态没有影响。

倾斜裂隙溶蚀中的浮力对流作用可分为两部分,即垂直于裂隙平面方向上(即图2中的 y 方向)



(a) 注入 20PV 溶液时的裂隙溶蚀形态



(b) 突破时的裂隙溶蚀形态

图4 不同倾角下的裂隙溶蚀形态

Fig.4 Dissolution morphology at different inclination angles

的浮力对流作用 ($\Delta\rho g \cos\theta$) 和沿裂隙长度方向上 (即图2中的 z 方向) 的浮力对流作用 ($\Delta\rho g \sin\theta$)。研究表明, 当裂隙初始平均开度小于不稳定临界开度时 ($b_0 < b_c$), 垂直于裂隙平面方向上不会出现浮力对流不稳定性, 即垂直于裂隙平面方向上的重力效应消失。根据 Li 等^[39]的研究, 不稳定临界开度的计算公式为 $b_c = 22[D_m \mu_f / (\Delta\rho g \cos\theta)]^{1/3}$ 。本研究中, 裂隙初始平均开度均小于不同倾角下的不稳定临界开度, 因此垂直于裂隙平面方向上不会出现浮力对流不稳定性。基于此, 后文只关注裂隙长度方向上的浮力对流作用, 忽略垂直于裂隙平面方向上的浮力

对流效应。

为探究倾角变化对裂隙溶蚀过程的影响, 采用理查森数 Ri_{II} 量化不同裂隙倾角下浮力对流强度与强制对流强度的相对大小^[23, 37-38]:

$$Ri_{II} = \frac{\Delta\rho_{eff} g l \sin\theta}{\rho_0 u_0^2} = \frac{\Delta\rho_{eff} g b_0^3 \sin\theta}{\sqrt{12} \rho_0 Pe^2 D_m^2} \quad (9)$$

式中: l 为特征长度, $l = (b_0^2/12)^{0.5}$; $\Delta\rho_{eff}$ 为溶蚀过程中有效密度差, $\Delta\rho_{eff} = \Delta\rho Da_{II} / (1 + Da_{II})$; Da_{II} 为第二达姆科勒数, $Da_{II} = k_s b_0 / D_m$ 。

以倾角为 0° 的水平裂隙溶蚀形态为参考 ($Ri_{II} =$

0), 分析相同 Pe 数下倾斜裂隙 ($0^\circ < \theta \leq 90^\circ$) 的溶蚀形态。由图 4 可知, $Ri_{II} > 10$ 时 (红色实线左上方), 相同 Pe 数下倾斜裂隙的溶蚀形态与水平裂隙溶蚀形态存在明显差异。而 $Ri_{II} \leq 10$ 时 (红色实线右下方), 相同 Pe 数下倾斜裂隙的溶蚀形态与水平裂隙溶蚀形态几乎一致。以上分析表明, 在倾斜裂隙溶蚀中, 浮力对流主导模式转变为强制对流主导模式的临界条件为 $Ri_{II,c} = 10$ 。 $Ri_{II} > Ri_{II,c}$ 时裂隙溶蚀为浮力对流主导模式, 裂隙溶蚀形态均表现为虫洞溶蚀, 其原因是重力诱导的浮力对流作用会促进溶蚀通道 (虫洞) 的发育。在此模式下, 倾角变大将会增大重力效应对虫洞发育的促进作用。 $Ri_{II} \leq 10$ 时裂隙溶蚀为强制对流主导模式, 重力效应影响很小, 因此裂隙倾角增加不会影响溶蚀过程。在此模式下, 大 Pe 数下裂隙溶蚀形态呈现均匀溶蚀模式 (uniform), 中等 Pe 数下表现为虫洞溶蚀模式 (wormholes), 小 Pe 数下为紧凑溶蚀模式 (compact)。

在强制对流主导模式下 ($Ri_{II} \leq Ri_{II,c}$), 重力效应可以忽略, 裂隙溶蚀过程受控于强制对流、扩散和反应之间的相互作用。研究表明, 在没有重力效应时, 虫洞溶蚀模式转变为均匀溶蚀模式的临界条件可通过渗透长度 l_p 与裂隙长度 L 的比值进行表征^[3, 19]:

$$\frac{l_p}{L} = \frac{b_0}{L} \left(\frac{1}{Da} + \frac{2Pe}{Sh} \right) = \lambda_1 \quad (10)$$

式中: Sh 为舍伍德数, $Sh = 4.86$; λ_1 为常数, $\lambda_1 = 0.25$ ^[47]。

将 $Da = Da_{II}/Pe$ 和 $Da_{II} = k_s b_0 / D_m$ 代入式 (10), 可得强制对流主导模式下虫洞溶蚀转变为均匀溶蚀模式的临界 Pe 数 Pe_u :

$$Pe_u = \frac{\lambda_1 L}{b_0} \frac{1}{\left(\frac{D_m}{k_s b_0} + \frac{2}{Sh} \right)} \quad (11)$$

将 $\lambda_1 = 0.25$, $b_0 = 0.226 \text{ mm}$, $L = 10 \text{ cm}$, $Sh = 4.86$, $k_s = 1.52 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 和 $D_m = 1.58 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 代入式 (11) 可得 $Pe_u = 241.8$ 。在强制对流主导模式下 ($Ri_{II} \leq Ri_{II,c}$), 重力效应不起作用, 当 $Pe \geq 241.8$ 时 (红色虚线右侧), 溶蚀形态呈现均匀溶蚀模式。

无量纲参数 Λ^{-1} 反映溶蚀前沿的形状, 定义为溶蚀前沿长度 (渗透长度 l_p) 与溶蚀前沿宽度 l_t 的比值, 可作为紧凑溶蚀转变为虫洞溶蚀模式的判据^[3, 19]。裂隙溶蚀中的渗透长度计算公式为 $l_p = b_0 (1/Da + 2Pe/Sh)$, 溶蚀前沿宽度计算公式为 $l_t = b_0 [1 +$

$0.1Pe)/(Pe \cdot Da_{\text{eff}})]^{0.5}$, 其中 Da_{eff} 为有效达姆科勒数, $Da_{\text{eff}}^{-1} = Da^{-1} + 2Pe/Sh$ 。基于此, 紧凑溶蚀转变为虫洞溶蚀模式的临界条件可以写为

$$\Lambda^{-1} = Pe \sqrt{\left(\frac{1}{Da_{II}} + \frac{2}{Sh} \right) \frac{1}{1 + 0.1Pe}} = \lambda_2 \quad (12)$$

式中: λ_2 为常数, $\lambda_2 = 6$ 。

将 $Da_{II} = k_s b_0 / D_m$ 代入式 (12), 可得强制对流主导模式下紧凑溶蚀转变为虫洞溶蚀模式的临界 Pe 数:

$$Pe_c = \frac{2}{\sqrt{\lambda_2^2 \left(\frac{D_m}{k_s b_0} + \frac{2}{Sh} \right) + 0.01 - 0.1}} \quad (13)$$

将 $\lambda_2 = 6$, $b_0 = 0.226 \text{ mm}$, $Sh = 4.86$, $k_s = 1.52 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 和 $D_m = 1.58 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 代入式 (13) 可得 $Pe_c = 13.6$ 。在强制对流主导模式下 ($Ri_{II} \leq Ri_{II,c}$), 重力效应不起作用, 当 $Pe \leq 13.6$ 时 (黑色虚线左侧), 溶蚀形态表现为紧凑溶蚀模式, $13.6 < Pe < 241.8$ (黑色和红色虚线中间) 溶蚀形态为虫洞溶蚀模式。

上述分析表明, Ri_{II} ($Ri_{II,c} = 10$) 和临界 Pe 数 (Pe_c 和 Pe_u) 是判断重力效应下倾斜裂隙溶蚀模式的重要无量纲参数。总体而言, $Ri_{II} > Ri_{II,c}$ 时裂隙溶蚀为浮力对流主导模式, 溶蚀形态均表现为虫洞溶蚀, 且倾角增加会促进溶蚀通道的发育; $Ri_{II} \leq Ri_{II,c}$ 时裂隙溶蚀为强制对流主导模式, 倾角增加不会影响溶蚀形态。在此模式下, $Pe \leq Pe_c$ 时溶蚀形态呈现紧凑溶蚀模式, $Pe_c < Pe < Pe_u$ 时表现为虫洞溶蚀模式, 而 $Pe \geq Pe_u$ 时为均匀溶蚀模式。上述溶蚀模式理论判据为现场条件下裂隙溶蚀模式的预测及 CO_2 地质封存渗漏风险的评估提供了依据。需要注意的是, 本文通过视觉观察溶蚀形态来识别裂隙溶蚀模式, 这一方法与以往的研究一致^[3, 19, 47]。溶蚀模式的转变 (从紧凑溶蚀到虫洞溶蚀, 再到均匀溶蚀) 是一个连续过程, 特别是在临界 Pe 数附近, 溶蚀形态较为相似。

为进一步探究重力效应对不同倾角裂隙溶蚀过程的影响, 图 5 给出了倾角为 0° 时的水平裂隙 (见图 5(a)、5(c)) 和倾角为 90° 时的垂直裂隙 (见图 5(b)、5(d)) 中, 注入 20PV 溶液时的流线分布和溶蚀形态。在倾角为 0° 的水平裂隙溶蚀中, 没有重力效应 ($Ri_{II} = 0$), 裂隙溶蚀过程受控于强制对流、扩散和反应之间的相互作用。较小 Pe 数下 ($Pe = 63$) 的水平裂隙溶蚀中, 流线向优势溶蚀通道汇集, 即不饱和和溶液优先流向虫洞, 溶质运移与溶蚀之间 “正反

馈机制”促进优势溶蚀通道的发育^[19]。大 Pe 数下 ($Pe=631$) 的水平裂隙溶蚀中, 流线分布较为均匀, 未出现汇集现象, 整个裂隙中的溶液浓度与初始浓度 (c_0) 接近, 因此溶蚀形态呈现均匀溶蚀模式。

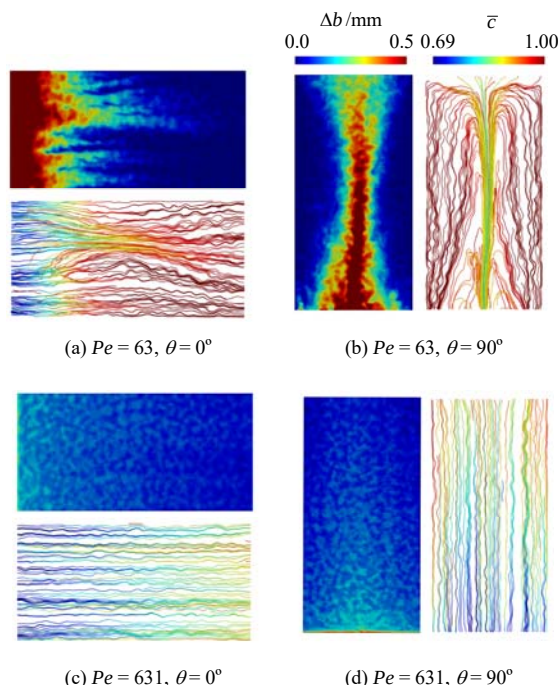


图5 裂隙溶蚀形态及流线分布

Fig.5 Dissolution morphology and streamline distribution

在倾角为 90° 的垂直裂隙溶蚀中, 重力效应对溶蚀形态和流场的影响取决于浮力对流于强制对流的相对大小, 即 Ri_{II} 数的大小。小 Pe 数下 ($Pe=63$) 的垂直裂隙溶蚀为浮力对流主导模式 ($Ri_{II} > 10$)。由于注入的不饱和溶液与饱和溶液之间的密度差, 重力诱发的浮力对流会显著改变流线分布: 密度较小的不饱和溶液聚集且快速地向上升流, 与 $NaCl$ 晶体反应后形成溶蚀通道, 反应后的溶液由于密度较大从溶蚀通道两侧向下流动, 进而形成“漩涡”流动结构的。这种非线性渗流-传质效应增强了壁面附近高浓度 (高密度) 溶液与不饱和溶液之间的混合, 从而加快了局部溶蚀速率。此外, 重力效应会增大溶蚀通道中的流体流动速度, 进而增加溶蚀前沿渗透长度, 促进溶蚀通道的发育。反之, 大 Pe 数下 ($Pe=631$) 的垂直裂隙溶蚀为强制对流主导模式 ($Ri_{II} \leq 10$), 裂隙倾角增加对溶蚀过程的影响很小。因此, 垂直裂隙 (见图 5(d)) 和水平裂隙 (见图 5(c)) 中的流线分布几乎一致, 未观察到漩涡结构。上述分析进一步表明, 裂隙倾角对溶蚀过程的影响取决于浮力对流与强制对流强度的相对大小 (Ri_{II})。在浮力对流主导模式下, 倾角增加才会显

著影响裂隙溶蚀形态和流线分布。

4.2 渗透率演化特征

裂隙溶蚀过程的渗透率演化特征对许多自然现象和工程应用具有重要意义, 例如, 注酸石油气强化开采, CO_2 的地质封存, 大坝安全以及地下水污染物迁移等^[48-49]。如前所述, 倾角增加对裂隙溶蚀形态有着重要影响, 而裂隙渗透率演化特征与溶蚀形态密切相关。为探究裂隙倾角增加对渗透率演化特征的影响, 本节统计分析不同流速和倾角下裂隙导水系数 T 的演化曲线。裂隙导水系数是渗透率 k 与裂隙平均开度的乘积, 已被广泛用于量化溶蚀过程中裂隙渗透性的演化^[25, 27], 其计算公式为

$$T = \frac{Q\mu_f L}{W\Delta P} \quad (14)$$

式中: ΔP 为裂隙进出口压差。导水系数可有效表征溶蚀作用 (裂隙结构变化) 所导致的渗透性演化。随着溶蚀过程的进行, 裂隙开度增大且形貌特征发生变化, 渗透率 (导水系数) 也随之不断演化。图 6 给出了不同流速和倾角下裂隙相对导水系数 (T/T_0) 随注入溶液量的变化, 其中 T_0 为初始状态下裂隙导水系数。在 $Pe=10.5 \sim 210.0$ 条件下, 裂隙倾角越大, 渗透率的增长速度越快。其原因是裂隙倾角增加会提高裂隙长度方向 (即图 2 中的 z 方向) 的浮力对流强度, 促进虫洞的发育。然而, 随着 Pe 数的增大, 强制对流强度增加, 裂隙倾角增大对渗透率演化的影响减小。当流速增大到 $Pe=421$ 时, 强制对流占据主导 ($Ri_{II} \leq 10$), 倾角增加不会改变裂隙溶蚀形态及流场分布, 因此倾角增加并不会影响渗透率增长速度。总体而言, 随着 Pe 数的增加, 裂隙倾角改变对渗透率演化的影响减小, 这进一步证明了裂隙倾角对溶蚀过程的影响取决于浮力对流与强制强度的相对大小。

4.3 突破时的注液量

突破时的注液量 PVBT (pore volume at breakthrough) 是碳酸盐岩酸化工程中的重要经济性指标。研究表明, 注液流速对突破时的注液量具有显著影响。如果溶液注入速度较小, 溶蚀呈现紧凑溶蚀模式, 溶蚀达到突破需要极大的注液量。反之, 如果注入流速较大, 溶蚀表现为均匀溶蚀模式, 溶液未能与岩石充分反应便流出裂隙, 导致溶液利用率降低。因此, 碳酸盐岩酸化工程需确定最佳的注入流速, 以实现溶蚀突破时的最小注液量, 从而达到最优的经济效益。

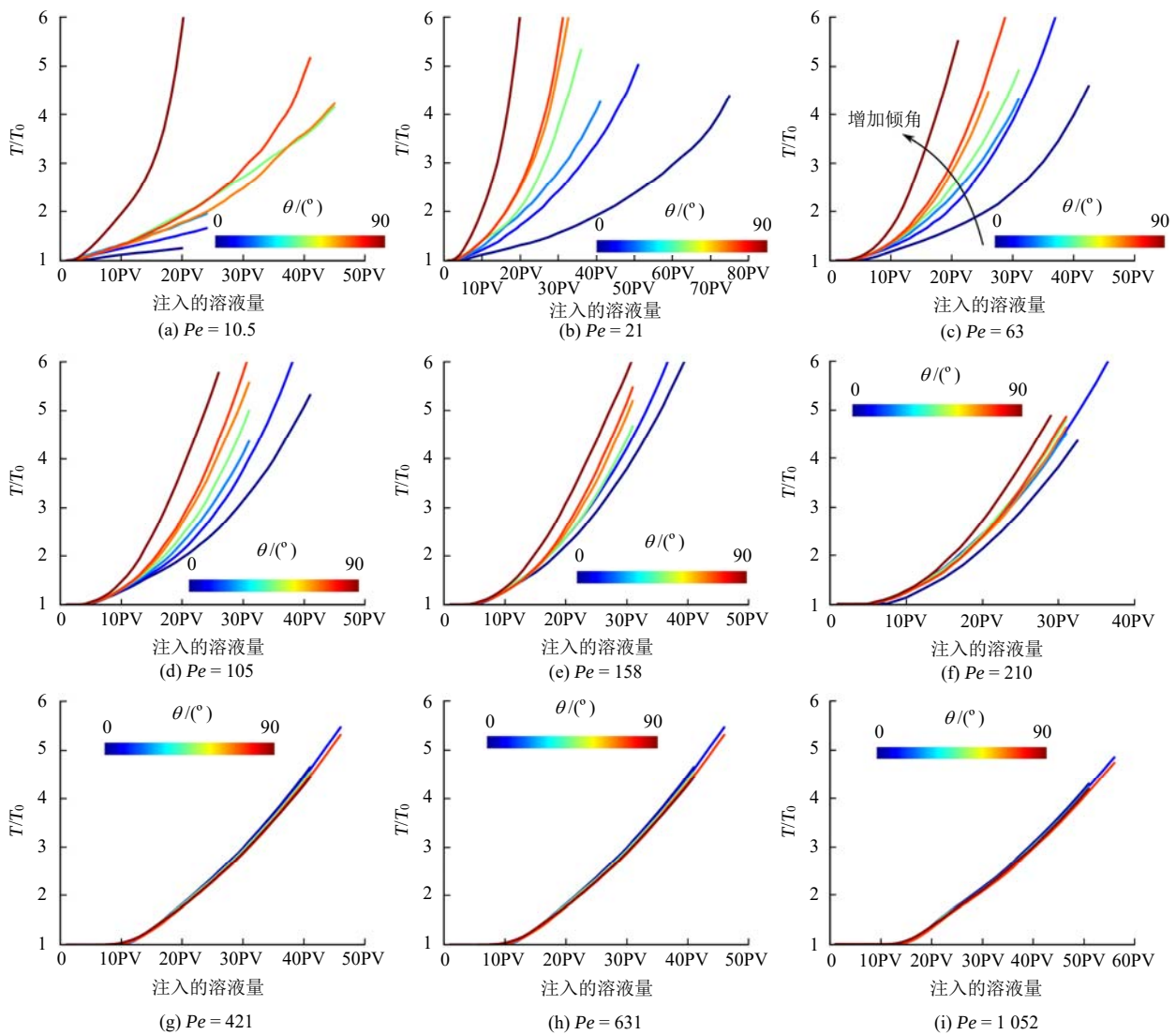


图6 不同倾角和流速下裂隙渗透率演化

Fig.6 Evolution of fracture permeability at different inclination angles and flow rates

当溶蚀前沿到达裂隙出口时,裂隙进入突破状态,此时模拟中的裂隙导水系数增加大约4倍。因此,PVBT定义为进出口压差缩小为初始时刻的1/4时的注入溶液体积与初始裂隙空隙体积的比值。为探究裂隙倾角增加对突破时注液量的影响,图7给出了不同 Pe 数下的PVBT随裂隙倾角的变化。由图可知,倾角增加对PVBT的影响与浮力对流与强制对流的相对强度密切相关。在强制对流主导模式下($Ri_{II} \leq 10$),浮力对流强度相对较小,重力效应不会影响裂隙溶蚀形态、流场分布以及渗透率演化特征。因此,相同 Pe 数下倾角增大对PVBT没有影响。而在浮力对流主导模式下($Ri_{II} > 10$),相同 Pe 数下PVBT随着倾角增加而减小,其原因是倾角增加促进漩涡的产生、虫洞的生长以及渗透率的增大。

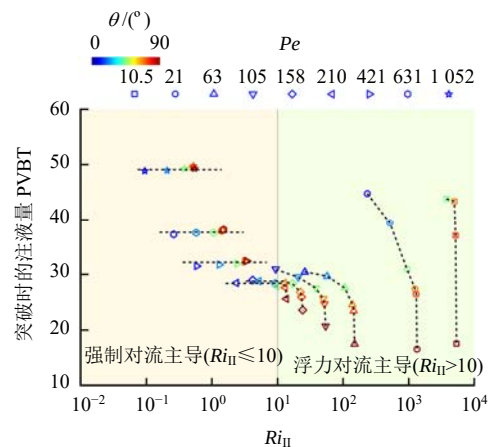
图7 不同 Pe 数下突破时的注液量(PVBT)随倾角的变化Fig.7 Pore volumes to breakthrough (PVBT) versus Ri_{II} for different Pe

图8给出了不同裂隙倾角下PVBT随 Pe 数的变化,空心符号表示试验数据。试验观测的PVBT

与模拟结果趋势一致, 且数值相近。由图可知, 在不同裂隙倾角下, PVBt 都随 Pe 数的增加呈现先减小后增大的趋势, 且最小值出现在中间 Pe 数下 (即最佳注入流速)。随着裂隙倾角的增加, 小 Pe 数下的 PVBt 减小, 并且最佳注入流速对应的 Pe 数减小。

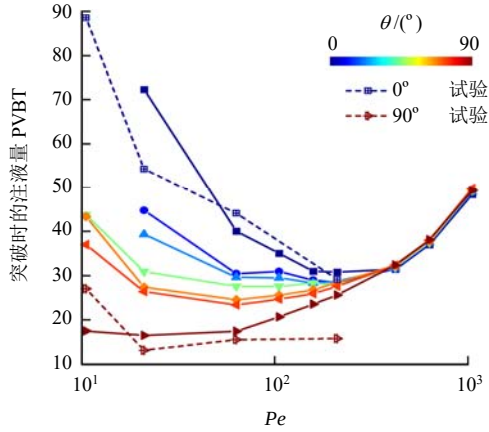


图8 不同倾角下突破时注液量 (PVBt) 随 Pe 数的变化
Fig.8 Pore volumes to breakthrough (PVBt) versus Pe for different inclination angles

以往研究表明, 在多孔介质溶蚀中, 最佳注入流速通常对应特定值的达姆科勒数 Da 或无量纲参数 A^{-1} [13, 22]。针对裂隙溶蚀, 达姆科勒数并不足以有效地确定最佳注入流速。因此, 本研究引入了无量纲参数 A^{-1} , 该参数能够反映溶蚀前沿的形状, 用于表征裂隙溶蚀过程中对流、扩散与反应之间的相互作用。然而该无量纲参数 (A^{-1}) 并未考虑重力效应及裂隙倾角的影响。重力效应会引起裂隙长度方向的浮力对流, 其特征速度与裂隙倾角有关, 不同倾角下裂隙长度方向的浮力对流速度 $u_g = k\Delta\rho_{eff}g\sin\theta/\mu_f$, 其中 k 为特征渗透率, $k = b_0^2/12$ [34-35]。因此, 考虑重力效应和裂隙倾角的无量纲参数 A_g^{-1} 可以写为

$$A_g^{-1} = Pe_g \sqrt{\left(\frac{1}{D_{II}} + \frac{2}{Sh}\right) \frac{1}{1 + 0.1Pe_g}} \quad (15)$$

式中: Pe_g 为考虑浮力对流作用的佩克莱数, $Pe_g = (u_0 + u_g)b_0/D_m$ 。

图9展示了 PVBt 与考虑倾角变化的无量纲参数 A_g^{-1} 之间的关系。由图可知, 在所有裂隙倾角下, PVBt 曲线均在 $A_g^{-1} = 32$ 附近达到最小值, 表明 $A_g^{-1} = 32$ 对应的注入流速为不同裂隙倾角下的最佳注入流速。在这一流速下, 裂隙渗透率增长的效率最高, 裂隙达到突破时所需的注液量最少。考虑重

力效应的无量纲参数 A_g^{-1} 提供了倾斜裂隙溶蚀的最佳注入流速理论预测模型, 对现场条件下的工程实践具有指导意义。需要注意的是, 裂隙的几何特征, 如粗糙度与宽度, 可能对裂隙溶蚀过程及渗透率演化特征产生一定影响。在强制对流主导的条件下, 已有研究表明裂隙粗糙度对溶蚀形态的影响较为有限 [50]。然而, 在浮力对流主导模式下, 裂隙宽度的影响尚未得到充分研究。裂隙宽度的变化可能显著改变溶蚀的不稳定性, 较宽的裂隙在相同 Pe 数条件下更容易导致溶蚀不稳定性, 并促使优势流通道的形成, 使得溶液集中流过局部区域, 从而加速虫洞的发育。尽管本研究主要聚焦于重力效应下裂隙倾角对溶蚀演化的影响, 裂隙宽度与粗糙度对溶蚀-渗流耦合机制的影响同样至关重要, 值得在未来的研究中进一步深入探讨。

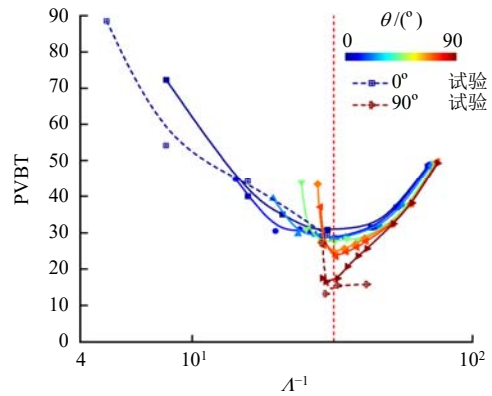


图9 不同倾角下突破时的注液量 (PVBt) 随 A^{-1} 的变化
Fig.9 Pore volumes to breakthrough (PVBt) versus A^{-1} for different inclination angles

5 结 论

本文结合数值模拟、可视化试验和理论分析, 系统探究了不同倾角裂隙的溶蚀模式与渗透率演化规律研究。首先通过裂隙渗流溶蚀可视化试验结果验证了考虑溶液密度变化的孔隙尺度模拟方法的有效性和合理性, 随后基于大量不同流速和倾角下粗糙裂隙溶蚀过程的数值模拟, 揭示了重力效应 (即在溶液具有密度差的情况下, 重力引起的浮力对流效应) 下倾角增加对裂隙溶蚀形态及渗透率演化特征的影响, 建立了重力效应下倾斜裂隙溶蚀模式理论判据 ($Ri_{II,c}$ 、 Pe_c 和 Pe_u), 进一步推导了考虑倾角变化的最佳注入流速理论预测模型, 为相关工程安全及过程控制提供了重要参考, 主要结论如下:

(1) 在倾斜裂隙溶蚀中, 重力效应主要通过引起裂隙长度方向的浮力对流, 显著影响溶蚀形态和

流线分布。密度较小的不饱和溶液聚集并迅速向上流动,与 NaCl 晶体反应后产生溶蚀通道,反应后的饱和溶液由于密度较大从溶蚀通道两侧向下流动,进而形成“漩涡”流动结构。裂隙长度方向的浮力对流作用引起的漩涡促进溶蚀通道的发育,有利于渗透率的生长。而垂直于裂隙平面方向的重力效应影响较小,可以忽略。

(2) 裂隙倾角对溶蚀过程的影响取决于浮力对流与强制对流强度的相对大小,即理查森数 (Ri_{II})。 $Ri_{II} > Ri_{II,c}$ 时 ($Ri_{II,c} = 10$) 裂隙溶蚀为浮力对流主导模式,溶蚀形态均呈现虫洞溶蚀模式;在相同 Pe 数下,裂隙倾角增加会促进漩涡的产生、虫洞的生长以及渗透率的生长。 $Ri_{II} \leq Ri_{II,c}$ 时裂隙溶蚀为强制对流主导模式,浮力对流强度相对较小,倾角增加不会对裂隙溶蚀产生显著影响;在此模式下, $Pe \leq Pe_c$ 时溶蚀形态呈现紧凑溶蚀模式, $Pe_c < Pe < Pe_u$ 时表现为虫洞溶蚀模式,而 $Pe \geq Pe_u$ 时为均匀溶蚀模式。

(3) 在浮力对流主导模式下 ($Ri_{II} > Ri_{II,c}$),裂隙倾角增加促进虫洞的发育和渗透率的生长,因此突破时的注液量 (PVB T) 随着倾角的增大而减小;强制对流主导模式下 ($Ri_{II} \leq Ri_{II,c}$),重力效应不起作用,不同倾角下的 PVB T 基本一致。基于溶蚀前沿理论,建立了考虑倾角变化的最佳注入流速理论预测模型。结果表明,不同倾角下的最佳注入流速均出现在 $A_g^I = 32$ 时。

参考文献

- [1] ZHOU C B, CHEN Y F, HU R, et al. Groundwater flow through fractured rocks and seepage control in geotechnical engineering: theories and practices[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2023, 15(1): 1-36.
- [2] LING B, SODWATANA M, KOHLI A, et al. Probing multiscale dissolution dynamics in natural rocks through microfluidics and compositional analysis[J]. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 2022, 119(32): e2122520119.
- [3] WANG T, HU R, YANG Z, et al. Transitions of dissolution patterns in rough fractures[J]. **Water Resources Research**, 2022, 58(1): e2021WR030456.
- [4] ZHOU C X, HU R, DENG H, et al. Surface-volume scaling controlled by dissolution regimes in a multiphase flow environment[J]. **Geophysical Research Letters**, 2023, 50(18): e2023GL104067.
- [5] 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 Ji-xiang, SONG Han-zhou, DU Jing-nong, 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.
- [6] DENG H, PETERS C A. Reactive transport simulation of fracture channelization and transmissivity evolution[J]. **Environmental Engineering Science**, 2019, 36(1): 90-101.
- [7] DETWILER R L. Experimental observations of deformation caused by mineral dissolution in variable-aperture fractures[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 2008, 113(B8): 1-12.
- [8] LI S, KANG Z, FENG X T, et al. Three-dimensional hydrochemical model for dissolutional growth of fractures in karst aquifers[J]. **Water Resources Research**, 2020, 56(3): e2019WR025631.
- [9] 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[J]. **水文地质工程地质**, 2022, 49(4): 19-29.
CHEN Wang-guang, ZENG Cheng, GONG Xiao-yu, et al. Hydrological and hydrochemical regime of a typical subterranean 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.
- [10] 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]. **地球化学**, 2023, 52(1): 94-104.
CHEN You-zhi, JIANG Fu-wei, YU Ning, et al. Geological conditions and genesis of red karst landforms in Hunan-Chongqing-Guizhou[J]. **Geochimica**, 2023, 52(1): 94-104.
- [11] TRINCHERO P, IRAOLA A, BRUINES P, et al. Water-mineral reactions in a translated single realistic fracture: consequences for contaminant uptake by matrix diffusion[J]. **Water Resources Research**, 2021, 57(10): e2021WR030442.
- [12] FU X, CUETO-FELGUEROSO L, BOLSTER D, et al. Rock dissolution patterns and geochemical shutdown of CO₂-brine-carbonate reactions during convective mixing in porous media[J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2015, 764: 296-315.

- [13] 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.
- [14] ROMANOV D, GABROVŠEK F, DREYBRODT W. Dam sites in soluble rocks: a model of increasing leakage by dissolutional widening of fractures beneath a dam[J]. **Engineering Geology**, 2003, 70(1-2): 17-35.
- [15] 陈建生, 李平, 王涛, 等. 青藏高原东缘水库绕坝基渗流化学溶蚀研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 610-616.
CHEN Jian-sheng, LI Ping, WANG Tao, et al. Chemical dissolution of seepage around dam foundation of a reservoir in eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(4): 610-616.
- [16] 徐力群, 赵邵峰, 沈振中, 等. 特高土心墙堆石坝坝基防渗体渗流-溶蚀特征研究[J]. 水利学报, 2023, 54(8): 942-954.
XU Li-qun, ZHAO Shao-feng, SHEN Zhen-zhong, et al. Seepage and dissolution analyses for impervious structure of dam foundation in super-high rockfill dams with soil core[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2023, 54(8): 942-954.
- [17] 张贵金, 徐卫亚, 赖苗. 溶蚀岩体的溶渗作用及岩溶坝区的渗透性研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 795-799.
ZHANG Gui-jin, XU Wei-ya, LAI Miao. Leaching of solution rock and permeability study under karst-engineering geological condition[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 795-799.
- [18] SOULAIN C, ROMAN S, KOVSCEK A, et al. Mineral dissolution and wormholing from a pore-scale perspective[J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2017, 827: 457-483.
- [19] SZYMCAK P, LADD A J C. Wormhole formation in dissolving fractures[J]. **Journal of Geophysical Research**, 2009, 114: B06203.
- [20] ZHOU C X, HU R, LI H W, et al. Pore-scale visualization and quantification of dissolution in microfluidic rough channels[J]. **Water Resources Research**, 2022, 58(11), e2022WR032255.
- [21] LI K, HU R, ZHANG Y N, et al. On the permeability-surface area-porosity relationship for dissolving porous media[J]. **Advances in Water Resources**, 2025, 196: 104900.
- [22] 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: 213-254.
- [23] HU R, LI K, ZHOU C X, et al. On the role of gravity in dissolving horizontal fractures[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 2023, 128(3): e2022JB025214.
- [24] HU R, WANG T, YANG Z, et al. Dissolution hotspots in fractures[J]. **Geophysical Research Letters**, 2021, 48(20): e2021GL094118.
- [25] SPOKAS K, PETERS C A, PYRAK-NOLTE L. Influence of rock mineralogy on reactive fracture evolution in carbonate-rich caprocks[J]. **Environmental science & technology**, 2018, 52(17): 10144-52.
- [26] 王珂, 盛金昌, 郜会彩, 等. 应力-渗流侵蚀耦合作用下粗糙裂隙渗流特性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(增刊1): 30-40.
WANG Ke, SHENG Jin-chang, GAO Hui-cai, et al. Study on seepage characteristics of rough crack under coupling of stress-seepage erosion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(Suppl.1): 30-40.
- [27] AMELI P, ELKHOURY J E, MORRIS J P, et al. Fracture permeability alteration due to chemical and mechanical processes: a coupled high-resolution model[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2014, 47(5): 1563-1573.
- [28] POLAK A, ELSWORTH D, LIU J, et al. Spontaneous switching of permeability changes in a limestone fracture with net dissolution[J]. **Water Resources Research**, 2004, 40(3): W03502.
- [29] LUO H, QUINTARD M, DEBENEST G, et al. Properties of a diffuse interface model based on a porous medium theory for solid-liquid dissolution problems[J]. **Computational Geosciences**, 2012, 16(4): 913-932.
- [30] LI L, GRACIE R, DUSSEAU M B, et al. Modeling and verification of non-linear mineral dissolution processes with buoyancy effects[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2023, 161, 105257.
- [31] 彭益, 张文, 王汉勋, 等. 某海岛地下水封油库渗流场数值模拟[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2024, 6(1): 94-104.
PENG Yi, ZHANG Wen, WANG Han-xun, et al. Numerical simulation of seepage field of underground water-sealed oil depot in an island[J]. **Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering**, 2024, 6(1): 94-104.
- [32] 周彩贵, 李景, 梁庆国, 等. 水工引水隧洞施工涌水量

- 预测方法对比[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2023, 5(1): 32-44.
- ZHOU Cai-gui, LI Jing, LIANG Qing-guo, et al. Comparison of water inflow prediction methods of hydraulic diversion tunnels during construction[J]. **Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering**, 2023, 5(1): 32-44.
- [33] 孙文斌, 曹震博, 董法旭. 断层破碎带岩石裂隙渗透性的表征方法[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2023, 5(1): 1-7.
- SUN Wen-bin, CAO Zhen-bo, DONG Fa-xu. Characterization method of rock fracture permeability in fault fracture zone[J]. **Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering**, 2023, 5(1): 1-7.
- [34] COHEN C, BERHANU M, DERR J, et al. Buoyancy-driven dissolution of inclined blocks: erosion rate and pattern formation[J]. **Physical Review Fluids**, 2020, 5(5): 053802.
- [35] PHILIPPI J, BERHANU M, DERR J, et al. Solutal convection induced by dissolution[J]. **Physical Review Fluids**, 2019, 4(10): 103801.
- [36] BERHANU M, PHILIPPI J, COURRECH DU PONT S, et al. Solutal convection instability caused by dissolution[J]. **Physics of Fluids**, 2021, 33(7): 076604.
- [37] DIJK P E, BERKOWITZ B, YECHIELI Y. Measurement and analysis of dissolution patterns in rock fractures[J]. **Water Resources Research**, 2002, 38(2): 5-1-5-12.
- [38] GUERIN A, DERR J, COURRECH DU PONT S, et al. Streamwise dissolution patterns created by a flowing water film[J]. **Physical Review Letters**, 2020, 125(19): 194502.
- [39] LI K, HU R, WANG T, et al. Buoyancy-driven dissolution instability in a horizontal hele-shaw cell[J]. **Langmuir**, 2024, 40: 4186-4197.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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 Zi-yi, 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.
- [43] LI K, HU R, CHEN X S, et al. Phase diagram and permeability evolution for dissolving vertical fractures in a gravity field[J]. **Advances in Water Resources**, 2024, 185: 104633.
- [44] KOLDITZ O, RATKE R, DIERSCH H J G, et al. Coupled groundwater flow and transport: 1. Verification of variable density flow and transport models[J]. **Advances in Water Resources**, 1998, 21(1): 27-46.
- [45] GUEVARA MOREL C R, VAN REEUWIJK M, GRAF T. Systematic investigation of non-Boussinesq effects in variable-density groundwater flow simulations[J]. **Journal of Contaminant Hydrology**, 2015, 183: 82-98.
- [46] CALCADA L A, MARTINS L A A, SCHEID C M, et al. Mathematical model of dissolution of particles of NaCl in well drilling: determination of mass transfer convective coefficient[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2015, 126: 97-104.
- [47] 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.
- [48] 刘新荣, 张吉禄, 周小涵, 等. 考虑轴向应力作用的贯通裂隙岩体变形及渗流特性研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(12): 3596-3612.
- LIU Xin-rong, ZHANG Ji-lu, ZHOU Xiao-han, et al. Deformation and seepage characteristics of precast fractured rock mass considering the influence of axial stress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(12): 3596-3612.
- [49] 李槟, 申海萌, 李琦, 等. 不同围压条件下花岗岩剪切过程渗透率动态演化规律数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2025, 46(增刊 1): 437-453.
- LI Bin, SHEN Hai-meng, LI Qi, et al. A numerical simulation of dynamic evolution of permeability during granite shear process under different confining pressures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2025, 46(Suppl.1): 437-453.
- [50] UPADHYAY V K, SZYMCAK P, LADD A J C. Initial conditions or emergence: what determines dissolution patterns in rough fractures?[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 2015, 120(9): 6102-6121.