DOI：10.16285/j.rsm.2025.0115 CSTR:32223.14.j.rsm.2025.0115

岩石正交裂隙内浆液驱替动水机制研究

李 博[1,2]，唐 敏[2]，刘蓉蓉[2]，谢雨施[2]，邹良超[3]，石振明[1]

（1．同济大学 地下建筑与工程系，上海 210092；2．绍兴文理学院 岩石力学与地质灾害浙江省重点实验室，浙江 绍兴 312000；
3．瑞典皇家理工学院 可持续发展与环境工程系，瑞典 斯德哥尔摩）

摘 要：裂隙是岩体内渗流的首要通道，裂隙岩体内的注浆封堵是一个由裂隙网络内浆液−水两相驱替控制的过程。鉴于裂隙网络由诸多交叉裂隙连接构成，研究浆液在交叉裂隙内的驱替机制对裂隙岩体工程注浆设计具有重要意义。采用三维重构技术，建立 3D 打印的透明粗糙正交裂隙模型并开展室内注浆可视化试验，观测注浆过程中浆−水竞争渗流规律及界面演化特征；基于 COMSOL Multiphysics 软件建立正交裂隙注浆数值模型，通过试验和数值结果对比验证模型，进而研究不同浆−水流速比、进出口组合等因素对浆−水驱替过程的影响。结果表明：动水条件下注浆开始后注浆压力随时间呈非线性增大，浆液首先沿优势渗流通道驱替水，在完成主要动水驱替后压力趋于稳定；交叉口处串流混合越充分，出口端的浆液体积分数越接近；优势渗流通道越显著，浆液的驱替效果越好；裂隙表面粗糙度显著影响注浆压力，采用传统的平行平板模型将低估注浆压力达 30%以上。

关 键 词：交叉裂隙；注浆；Herschel-Bulkley 模型；动水；驱替
中图分类号：TU 452 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－7598 (2026) 01－0337－12

Mechanism of grout-flowing water displacement in orthogonal rock fractures

LI Bo[1,2], TANG Min[2], LIU Rong-rong[2], XIE Yu-shi[2], ZOU Liang-chao[3], SHI Zhen-ming[1]

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 210092, China;
2. Key Laboratory of Rock Mechanics and Geohazards of Zhejiang Province, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China;
3. Royal Institute of Technology, Department of Sustainable Development and Environmental Engineering, Stockholm, Sweden)

Abstract: Fractures are the primary pathways for fluid flow in rock masses, and they commonly occur as interconnected networks. Rock grouting is a process in which flowing water is displaced by grout. Since rock fracture networks are formed by a large number of crossed fractures, it is of great significance to study the displacement of grouts under the action of flowing water for designing effective grouting schemes. In this study, a rough orthogonal fracture model was established using three-dimensional reconstruction, and a laboratory visualization grouting test was conducted. We developed a numerical orthogonal fracture model using COMSOL Multiphysics to investigate the effects of fracture roughness, the grout-to-water flow rate ratio, and inlet–outlet configurations on the grout–water displacement process. After validation, the experimental and simulation results suggest that grout primarily fills well-connected channels. Grouting pressure rises rapidly after injection and stabilizes once most water is displaced. Efficient mixing at intersections yields more consistent grout volume fractions across branches. Displacement efficiency is governed by the dominant flow channels. If the conventional parallel-plate model is used, which ignores fracture surface roughness, the grouting pressure may be underestimated by more than 30%.

Keywords: crossed-fracture; grouting; Herschel-Bulkley model; flowing water; displacement

1 引 言

注浆是增强裂隙岩体完整性和密封性，防治突涌水等地质灾害的有效工程手段之一。岩体内的裂隙网络是地下水流动和浆液扩散的主要通道。注浆过程中，浆液沿裂隙驱替既存的地下水，并逐渐凝固形成注浆加固圈。该过程既受到浆液自身流变特性的控制，又受到岩体内渗流路径的影响。由于单裂隙内空腔结构和裂隙网络空间结构的复杂性，定量评价其中的浆液扩散机制仍十分困难。岩体裂隙

收稿日期：2025-01-29 录用日期：2025-04-29
基金项目：国家自然科学基金项目（No.42077252，No.42377162）；中央高校基本科研业务费（No.22120230311）。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42077252, 42377162) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (22120230311).
第一作者简介：李博，男，1981 年生，博士，教授，主要从事岩体多场耦合特性方面的研究工作。E-mail: libotj@tongji.edu.cn
通信作者：邹良超，男，1987 年生，博士，副教授，主要从事水文地质方面的研究工作。E-mail: lzo@kth.se

网络由大量交叉裂隙组合构成，因此，有必要通过新型试验手段结合数值模拟深入探究交叉裂隙内浆液的渗流扩散以及与驱替动水规律，为裂隙岩体工程注浆工艺优化提供科学依据。

常用的注浆材料是典型的非牛顿流体，其剪应力与剪切应变率呈非线性关系，可用 Bingham 模型、幂律模型等描述。浆液还表现出屈服行为，即只有当作用在流体上的剪切应力大于屈服强度时，流体才发生流动[1]。Bingham 模型考虑了屈服应力和线性的流变规律，然而浆液的流变行为可以是剪切稀化型[2-4]或剪切稠化型[5-6]，取决于固体浓度（水灰比）、颗粒间的相互作用、颗粒大小和形状等参数[7]。Bingham 模型在某些条件下会高估剪切稀化流体或低估剪切稠化流体的屈服应力[8]。因此，Bingham 模型属于部分简化的非牛顿流体流变模型，在预测浆液流动规律上容易造成误差。由 Herschel 和 Bulkley 提出的三参数（屈服应力、稠度指数和流变指数）Herschel-Bulkley（简称 H-B）流变模型作为幂律模型与 Bingham 模型的结合和改进，既能反映流体的屈服特性，又能反映流体的剪切稀化或稠化特征，可以更为准确地表征浆液的流动特性[9]。

近年来，学者们广泛探讨了 H-B 流体在地质体中的流动特性。章敏等[10]基于柱坐标系下的流体连续性方程和动量方程，从理论上推导了 H-B 流体在光滑倾斜裂隙中的径向扩散流，探讨了注浆压力和流变指数等对扩散规律的影响；杨仙等[11]基于分形理论建立了 H-B 流体在多孔介质中的渗流模型，详细分析了压力梯度、流变指数、稠度系数及孔隙率等参数对 H-B 流体在多孔介质中瞬时平均流速的影响；Di Federico 等[12]建立了 H-B 流体在单裂隙多孔介质中的二维（2D）流动理论模型。在试验方面，Hakansson[13]采用 8 种流变模型拟合剪切应力−剪切速率的测试数据，发现 H-B 模型相对于其他流变模型可以更好地描述浆液的流变特征；张乐等[14]开展 H-B 流体在透明裂隙中驱替油的试验，揭示了浆液性质对驱替模式的影响；Castro 等[15]采用具有屈服应力的生物聚合物溶液开展了一系列流动试验，测量了天然裂隙注浆过程中注入流量与压力损失之间的关系；李博等[16]利用粒子图像测速法（particle image velocity，简称 PIV），定量观测了 H-B 流体在在平直裂隙内的柱塞流分布。在数值分析方面，Burgo 等[17]用数值方法研究了 H-B 流体在不规则模型中的流动过程，建立了体积流量、压力梯度、幂律指数和雷诺数之间的关系；罗平平等[18]基于多重分数布朗运动（multi-fractional Brownian motion，简称 MBM）分形理论，研究了单裂隙面隙宽分布对浆液渗透的影响；李训刚等[19]采用 COMSOL 软件，分析了纳米碳酸钙水泥浆液在粗糙单裂隙中的流动行为；杨坪等[20]建立动水环境下单裂隙注浆堵水模型，揭示了浆液扩散距离与粗糙度的关系；魏建平等[21]对煤样初始状态和注浆后状态分别进行了 CT 扫描和渗透性测试，并将 CT 扫描重构后的模型导入 COMSOL 软件中建模，研究了浆液在裂隙网络内渗流扩散的基本规律。

上述研究主要集中于单裂隙中的浆液渗流机制，然而天然岩体具有复杂的裂隙网络，浆液在裂隙交叉口处将与既存的地下水混合，其驱替过程难以用从单裂隙获取的认知来完全解释。目前，仅有少量学者研究了交叉裂隙对渗流的影响。田开铭[22]通过交叉裂隙层流试验，发现交叉裂隙中流体流动存在偏流现象；速宝玉等[23]通过交叉裂隙水流模拟试验，建立了交叉裂隙局部水头损失理论模型，并根据模型试验结果与理论模式的相关性分析，确定了理论模型的修正系数；Wilson 等[24]用直径相同的圆管构建正交裂隙，通过试验获得了交叉处两种混合模式的临界条件；Mourzenko 等[25]考虑对流和扩散过程，通过数值模拟揭示了表面粗糙度对交叉裂隙中溶质运移过程的影响；Johnson 等[26]通过示踪法，观察到粗糙裂隙交叉处的窜流和增强混溶现象；刘日成等[27]通过试验与数值模拟相结合的方法，界定了三维交叉裂隙中流态由线性转为非线性的临界雷诺数；Li 等[28]基于正交粗糙裂隙研究了表面粗糙度和剪切过程对三维交叉裂隙中流体流动和溶质运移的影响；崔澈等[29]基于岩体离散裂隙网络（discrete fracture network，简称 DFN）模型，研究了不同裂隙网络和注浆压力条件下裂隙岩体中的浆液扩散特征。上述研究尚未考虑非牛顿流体在交叉裂隙中的渗流扩散过程以及对牛顿流体的驱替机制。

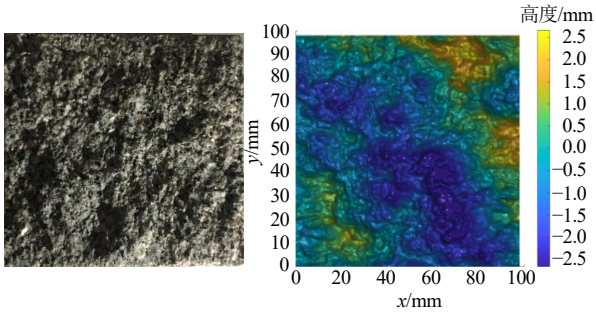
裂隙岩体注浆时，浆液将在单个裂隙交叉口进行重分配，进而影响整个岩体中的浆液扩散行为[30]，该过程还受到裂隙中既有流体的影响。本研究瞄准这一关键科学问题，开展正交裂隙注浆驱替可视化试验和高精度有限元数值模拟，深入探究动水作用下浆液在岩体交叉裂隙中的驱替机制，助力工程岩体注浆效率提升。

2 试验方法

2.1 三维交叉裂隙模型的建立

天然正交裂隙表面难以直接获取，故选取边长为 100 mm 的未风化中粒花岗岩正方体试样，通过

万能材料试验机开展劈裂试验生成粗糙裂隙表面。采用分辨率为0.1 μm的高精度轮廓扫描仪（Keyence VR-3100 3D）扫描裂隙表面，得到如图 1 所示的岩石粗糙裂隙面形貌数据，其中图 1(b)表面数字化图像右侧所示色卡数值为垂直于裂隙面的高度值（mm）。



(a) 表面照片　　(b) 表面数字化图像

图 1　粗糙裂隙表面形貌

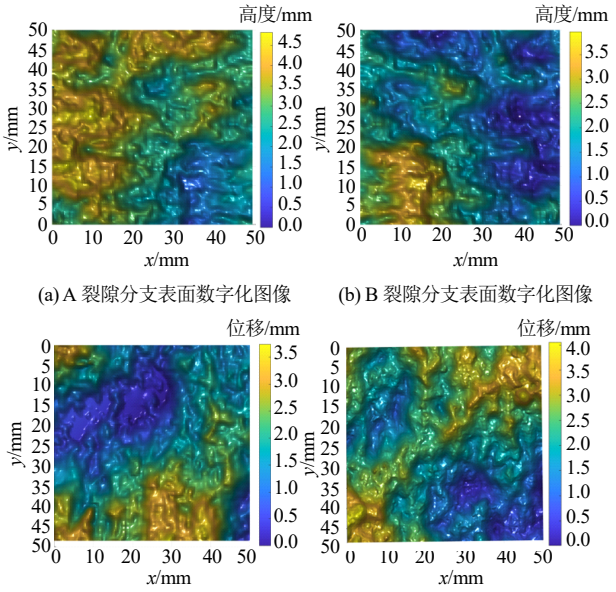
Fig.1　Rough fracture surface morphology

选取 4 个对称区域构成交叉裂隙模型的 4 个裂隙分支面，构建 4 个平均开度 h 为 1.82 mm 且体积相近的裂隙空腔，各裂隙分支均由一个粗糙面和一个光滑平面构成，渗流图像由光滑面采集。因此，该模型可视为沿光滑平面对称的半裂隙模型。同时建立一个与粗糙交叉裂隙模型尺寸相同的平行平板交叉模型作为对照模型，模型开度为 1.82 mm。Z_2 是一个用来表征裂隙面在给定剖面上平均坡度的指标，与岩石节理粗糙系数 JRC 之间存在一定关系，因此常用来表示岩石裂隙的表面粗糙度。Z_2 一般用来定量描述二维（2D）剖面，但对于粗糙岩石表面，相邻剖面之间的斜率信息缺失，无法体现三维特征，因此采用 Z_2^{3D} 来定量描述裂隙表面的粗糙度[28]。粗糙交叉模型各裂隙分支的表面形貌如图 2 所示，各裂隙分支的表面形貌参数如表 1 所示，其中 JRC 由 Z_2 换算得到[31]。三维交叉裂隙模型如图 3 所示。为了方便区分，分别用 A、B、C、D 定义 4 个分支。

2.2　注浆可视化试验

试验系统如图 4 所示，主要由注浆模块与数据采集模块组成，包括 ISCO 260D 柱塞泵、Keller PR-41X 高精度压力传感器、高速相机等仪器。将模型试件固定在试验台上，先用纯净水充满裂隙空腔，排出模型中残留的气泡；然后通过柱塞泵向模型一个入口持续注入恒体积流量的纯净水，模拟地下动水环境；最后，待流动稳定后向另一个入口持续注入恒体积流量的浆液，模拟现场注浆过程。

模型的4个裂隙分支分别连接4个压力传感器，实时监测试验过程中各裂隙分支出入口的压力变化，此时的压力是浆水共同作用的总压力。使用相机 1 拍摄记录浆液从注浆口流入裂隙面的流动状态，相机 2 记录注浆口相对的裂隙出口分支内流动情况，注水口的裂隙分支放置相机 3 捕捉动水作用下浆液−水两相驱替过程，相机 4 捕捉注水口对应的出口端内浆−水流动情况。采集期间保持各相机的位置和焦距不变，图像采集频率为 60 帧/s。



(a) A 裂隙分支表面数字化图像　　(b) B 裂隙分支表面数字化图像

(c) C 裂隙分支表面数字化图像　　(d) D 裂隙分支表面数字化图像

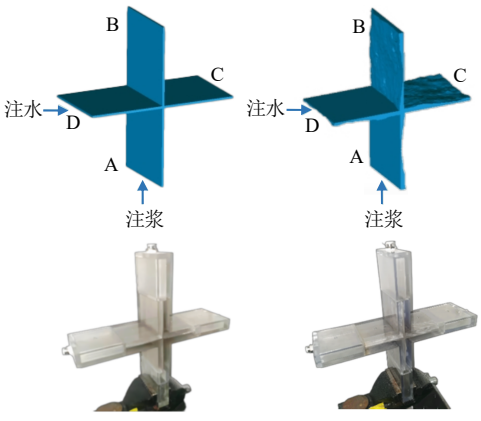
图 2　各裂隙分支表面数字化图像

Fig.2　Surface morphology of each branch fracture

表 1　各裂隙分支几何参数表

Table 1　Geometric parameters of each fracture branch

裂隙分支	Z_2^{3D}	平均开度/mm	空腔体积/mm²	节理粗糙度系数 JRC
A	0.50	1.82	8 554.79	5.12
B	0.52	1.82	8 575.32	5.57
C	0.61	1.82	8 544.13	5.62
D	0.53	1.82	8 711.31	5.58



(a) 三维平板交叉裂隙模型　　(b) 三维粗糙交叉裂隙模型

图 3　三维交叉裂隙模型

Fig.3　Three-dimensional crossed-fracture model

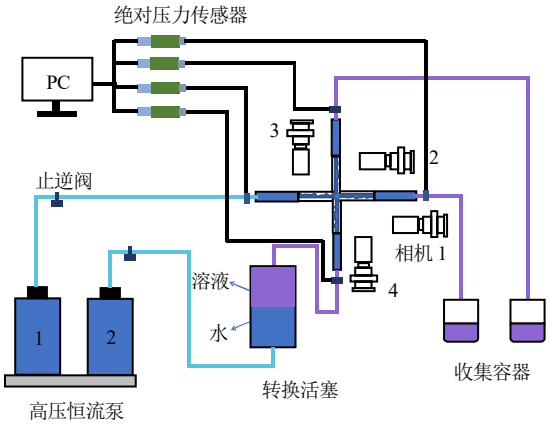


图 4 试验系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of testing system

由于各个分支几何形貌各异，为探究粗糙度与出入口组合的共同影响，在保持浆液始终由底部注入，水由模型左侧注入的条件下，将模型顺时针旋转 90°，开展不同工况下的驱替试验，如表 2 所示。选取流体流量 Q 分别为 3.34×10^{-8}、6.68×10^{-8}、1.00×10^{-7} m^3/s 三种不同的注浆流量以及恒定的注水流量（Q=3.34×10^{-8} m^3/s）开展测试，即浆−水流量比为 1:1、2:1、3:1 的 3 种工况。为了探究动水对浆液在交叉裂隙内扩散的影响，同时选取不同工况模型关闭动水泵，使其呈 3 个开放边界，分别开展了一组静水状态下（即浆−水流量比为 1: 0），浆液在交叉裂隙内扩散的对比试验。

表 2 不同工况下注入和出口情况

Table 2 Inlet and outlet under different working conditions

工况	水流注入口	浆液注入口	出口
①	D	A	B、C
②	A	C	D、B

采用聚丙烯酸钠水溶液模拟注浆工程中常用的水泥浆液，其水溶液具有高黏度和剪切稀化特性，与实际水泥浆液的流变特性类似，可以较好地模拟典型浆液的非牛顿流动特性[16, 32-33]。为达到示踪效果，在配备的模拟浆液内滴入 1×10^{-3} mol/L 的黑色染色剂以提高成像质量。

2.3 图像处理

将采集到的图像以数组矩阵的形式存储，各像素点的像素即为组成数组矩阵的元素，这些元素位于图像空间中的特定位置，以坐标(u, v)表示。

像素坐标系是用来描述像素空间的数学模型，与图像坐标之间可以相互转化。同一像素点在像素坐标系下可表示为(u, v)，在图像坐标系下可表示为(x, y)。设相机光轴与成像面之间的交点 O 为坐标原点(u_0, v_0)，坐标轴上的单位像素的尺寸为 dx、dy，则像素坐标系与图像坐标系之间的关系如下[34]：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{\mathrm{d}x} & 0 & u_0 \\ 0 & \dfrac{1}{\mathrm{d}y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

动水注浆是一个水泥浆驱替地下动水的过程，因此需要将浆−水两相分离以研究浆液在裂隙内的驱替形态。二值化是一种常见的图像分割方法[35-39]，该方法采用人工或自适应的方法，通过设置适当的阈值，分割注浆区域。阈值分割原理如下式所示：

$$D(u,v)=\begin{cases} 255, & f(u,v)>D_{\mathrm{s}} \\ 0, & f(u,v)\leqslant D_{\mathrm{s}} \end{cases} \tag{2}$$

式中：$D(u, v)$为二值图像的像素坐标的灰度值；D_{s}为阈值。当图像像素点坐标的灰度值$f(u, v)$大于 D_{s}时，则将相应的像素点设为 255，反之，将其设为 0，从而得到仅含有 0 与 255 的二值图像[40]。

在图像采集过程中，噪声和畸变会导致图像失真，需对采集到的图像进行预处理。鉴于本研究对驱替界面（即图像边缘的形态）有较高的需求，因此采用 MATLAB 对获取的图像进行双边滤波降噪处理（图 5）。双边滤波算法是一种具有双重滤波作用的非线性滤波算法，包含有 2 个高斯基的滤波函数，对图像空间邻近关系与像素值相似性非线性结合实现对噪声的自适应去除，可以达到保持边缘、降噪平滑的效果[41-42]。降噪处理后的图像具有明显的浆−水两相界面，能够直观地呈现浆−水两相在不同时刻下的驱替进程。



图 5 图像处理步骤

Fig.5 Image processing procedure

3 数值模型

将图 3 所示交叉裂隙模型导入 COMSOL Multiphysics 中建立与试验模型相同的数值模型，如图 6 所示。工况②是工况①顺时针旋转 90°得到的模型。

采用 COMSOL 软件中的流体流动−层流接口以及多物理场−两相流相场接口。其中层流接口用于求解动量守恒的 Navier-Stokes（简称 N-S）方程以及

质量守恒的连续性方程；两相流相场接口用于浆液和水的两相耦合计算。设置流动模式为层流，开展瞬态模拟。值得注意的是，H-B 模型在剪切应力τ=0 处非连续，难以直接求解，通常采用 Papanastasiou 近似，得到$\tau \neq 0$ 的本构方程[43]：

$$\left.\begin{aligned}&\dot{\gamma}=0,\ \ \tau<\tau_0\\&\tau=\tau_0\left[1-\exp\left(-m_{\mathrm{p}}\dot{\gamma}\right)\right]+k\dot{\gamma}^n,\ \ \tau\geqslant\tau_0\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

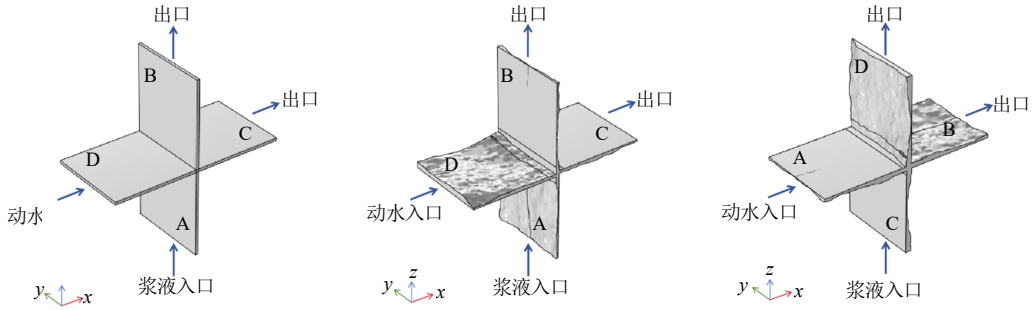
式中：τ_0 为屈服应力；k 为流体的稠度；$\dot{\gamma}$ 为剪切速率；n 为流变指数；m_{p} 为流体一致性系数。该模型被称作 Herschel-Bulkley-Papanastasiou（简称 H-B-P）模型，模型中的参数可通过拟合流变曲线得到。

求解质量及动量守恒方程得到水和浆液在岩体裂隙内的压力场及渗流场，其中浆液流动符合 H-B-P 模型[16]。分别将模型中平行于 x 轴、z 轴的两对相对边界设置为入口和出口，模型两侧设为无滑移边界。在入口边界上施加恒定流量 Q，出口设为开放边界。将浆液入口处的流体设置为入侵相，水流入口处设置为被驱替相。设置与试验相同的流体参数，见表 3，其中流体温度为 20 ℃。

4　结果与分析

4.1　试验与模拟获取的驱替过程对比

本研究采用的驱替测试及数值模拟方法的可靠性在以往的单裂隙注浆研究中得到了验证[44]，这里基于交叉裂隙内的驱替结果进一步验证该方法。选取浆-水比 1:1 工况下 A、B、C 分支（D 为动水流入分支）的浆液驱替结果开展试验与数值模拟对比，如图 7 所示。图中黑色和蓝色代表水，白色和红色代表浆液，浆液从底部向上流动。



(a) 平行板模型　(b) 粗糙模型工况①　(c) 粗糙模型工况②

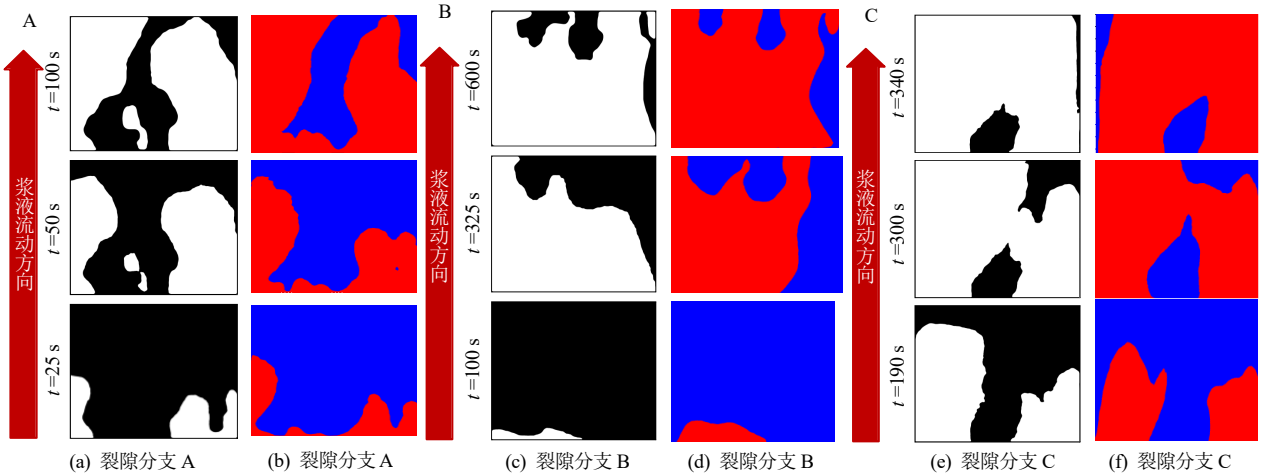
图 6　三维交叉裂隙数值模型

Fig.6　Three-dimensional crossed-fracture numerical model

表 3　数值模拟参数

Table 3　Parameters used in the numerical simulation

流体流量 Q/(10^{-8}m^3 • s^{-1})			水密度ρ_1/(kg • m^3)	水动力黏度 μ_1/(Pa • s)	浆液密度 ρ_2/(kg • m^{-3})	浆液稠度指数 k/(Pa • s^n)	流变指数 n	屈服应力 τ_0/Pa	一致性系数 m_{p}/s	扩散系数 D/(m^2 • s^{-1})	入口浓度 C_0/(mol • m^{-3})
1	2	3									
3.34	6.68	10.0	9.997×10^2	1.307×10^{-3}	987	0.9611	0.4123	0.6889	100	1×10^{-9}	1



(a) 裂隙分支 A 试验结果　(b) 裂隙分支 A 模拟结果　(c) 裂隙分支 B 试验结果　(d) 裂隙分支 B 模拟结果　(e) 裂隙分支 C 试验结果　(f) 裂隙分支 C 模拟结果

图 7　裂隙分支 A、B、C 内驱替试验和模拟结果对比（白色和红色：浆液；黑色和蓝色：水）

Fig.7　Comparison of the displacement between the experimental and simulation results of branches A, B and C (white and red: grout; black and blue: water)

浆液总体以驱替水的形式在饱水裂隙中运移。驱替过程中，浆液大致呈现出以入流边界为起点的平推流，在浆液的持续注入下，注浆前缘出现“黏性指进”现象。浆液到达出口边界后，裂隙内形成明显的优势驱替通道，该通道受裂隙内空腔几何特征的控制，在不同分支中表现出不同的形态。由于动水作用，驱替达到稳态后，浆液不能完全置换出模型中的水，呈现浆-水共同流动的形态，在裂隙内形成滞留区。

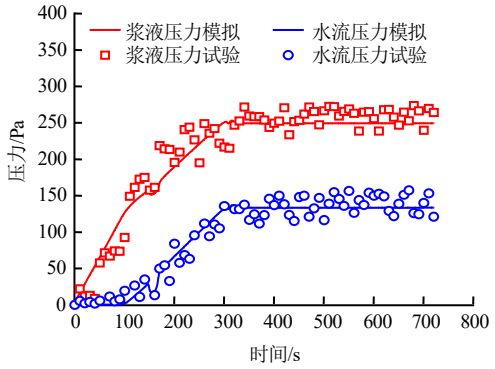
考察同一时间点上浆液扩散形态，可见可视化系统采集的结果与数值模拟结果吻合较好，捕捉到了浆液绕过低渗区曲折流动，通过优势通道快速突破，然后逐渐驱替低渗区水的过程。该对比初步验证了试验方法与数值模型的可靠性。

4.2 注入压力演化规律

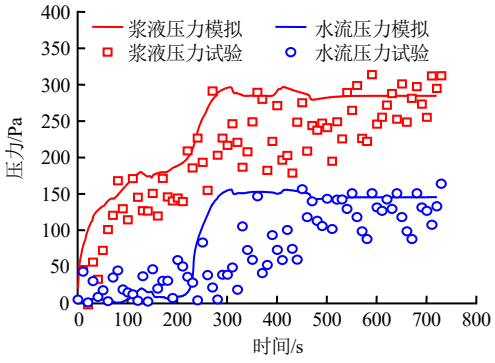
注浆过程中注浆口和注水口的压力演化如图 8 所示。注浆开始后，注浆压力迅速上升，在达到一个平台期短暂放缓之后再次迅速上升，在足够长的时间后压力最终趋于恒定值。此时，裂隙内可驱替的水被浆液替换，渗流从瞬态变成稳态。上述平台期在不同工况下出现在不同时间段：浆-水流量比 1:1 的工况下出现在 100～200 s 之间，随着浆-水流量比增大而提前，在 3:1 的工况下发生在 40～70 s 之间。与之相比，注水压力在初期保持不变，在平台期结束时与注浆压力同步迅速上升，最终趋于稳定。该平台期与浆液前沿突破裂隙达到出口的时间一致，可认为是浆液沿优势通道突破后产生的一个短期压力释放。随后浆液继续驱替更小空腔中的水，由于这些水更难驱替，压力再次急剧上升。浆-水流量比越大，注浆和注水压力都增大，即大流量注浆封堵伴随的是注浆压力和成本的上升，收益是快速驱替裂隙中的动水。

裂隙表面粗糙度是影响注浆压力的重要因素之一。基于和粗糙交叉裂隙开度一致的平板交叉裂隙，测试得到浆-水流量比 1:1、2:1 和 3:1 三种工况下进入稳定阶段后的压力值分别为 185、307、350 Pa。与粗糙交叉裂隙相比，若不考虑表面粗糙度的影响（即平行平板模型），将低估真实粗糙交叉裂隙注浆压力 30%以上，且该误差随浆-水流量比的增大而增大，在实际工程注浆压力评价中该误差不容忽视。试验与数值模拟所得的压力数据吻合良好（决定系数 R^2=0.95），进一步验证了研究方法的有效性。

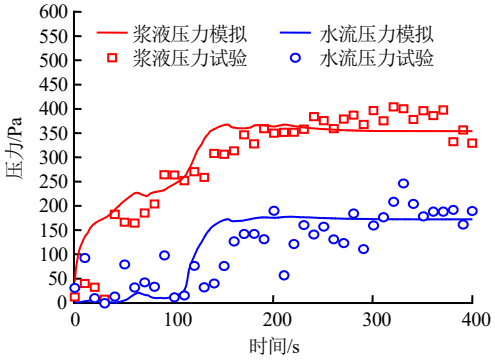
注浆过程中模型交叉口处的压力演化如图 9 所示。浆液注入初期，随着流体的流入，各分支在交叉口处的压力呈线性增长，在到达某个特定时间点



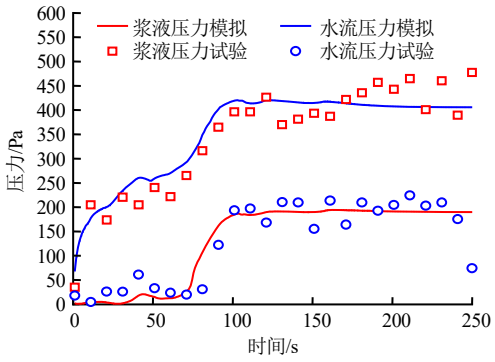
(a) 平板交叉裂隙浆水流量比为 1:1



(b) 粗糙交叉裂隙浆水流量比为 1:1



(c) 粗糙交叉裂隙浆水流量比为 2:1

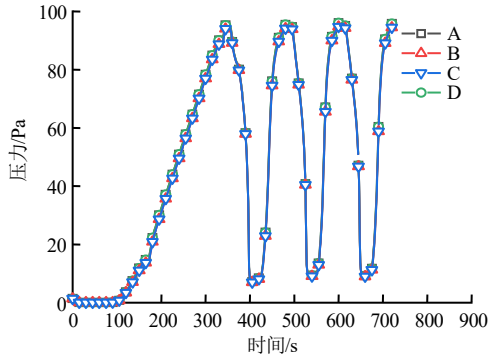


(d) 粗糙交叉裂隙浆水流量比为 3:1

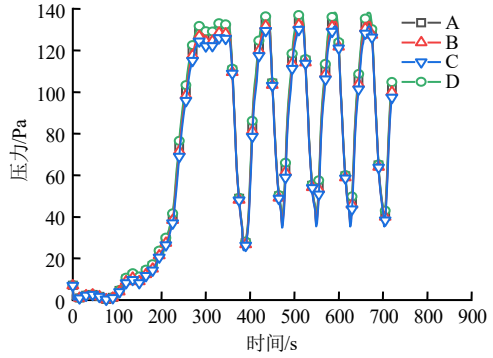
图 8 交叉裂隙中浆-水压力随时间的演变规律

Fig.8 Evolutions of grout and water injection pressures over time

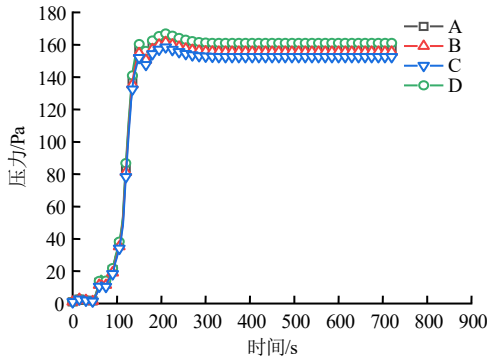
达到稳定，该稳定时间与入口的压力达到稳定的时间保持一致。由于 D 分支在交叉口处不仅受到注入水的压力，同时受到浆液逆流产生的反作用力，因此 D 分支交叉口的压力始终略大于其余分支。



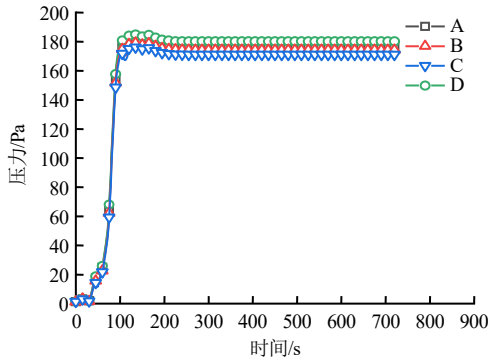
(a) 平板交叉裂隙浆水流量比为 1:1



(b) 粗糙交叉裂隙浆水流量比为 1:1



(c) 粗糙交叉裂隙浆水流量比为 2:1



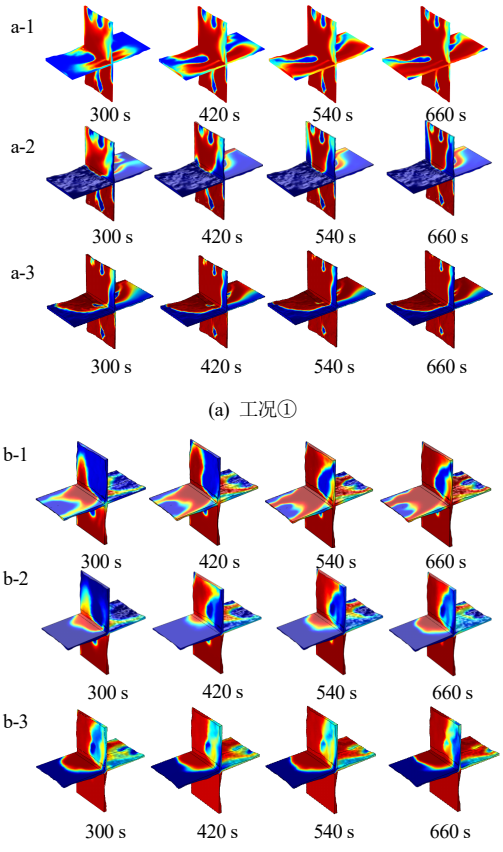
(d) 粗糙交叉裂隙浆水流量比为 3:1

图 9　裂隙交叉口处各分支压力随时间的演变规律

Fig.9　Temporal evolution patterns of pressure in each branch at the fracture intersections

4.3　浆-水驱替时空分布特征

图 10 展示了浆-水流量比 1:0（图 10(a)、10(b)中 a-1 和 b-1）、1:1（图 10(a)、10(b)）中 a-2 和 b-2 和 3:1（图 10(a)、10(b)中 a-3 和 b-3）条件下由数值模拟得到的浆-水分布图，图中红色代表浆液，蓝色代表动水，其他颜色代表了浆-水界面产生的混溶层。在平板模型中，浆液以平推的方式驱替地下水，进入交叉口后均匀进入两个出口分支，各分支内浆液的体积仅取决于浆-水流量比。相比之下，粗糙交叉裂隙中的浆液驱替过程更为复杂。如图 10 所示，在静水状态下，浆液由注浆端稳定流入，在裂隙交叉口均匀分流，水平方向浆液基本呈对称性扩散。在动水条件下，浆液在裂隙交叉口处有明显的窜流现象，该现象主要由裂隙交叉口处不规则的几何形状和过流能力引起。窜流会加剧浆液与动水的混流，积聚于浆液驱替前缘的浆液来不及向周围扩散就直接被动水冲出裂隙，显著改变各个分支浆液和水的比例。



(a) 工况①

(b) 工况②

图 10　不同工况下的浆-水分布演化图

Fig.10　Evolutions of the grout-water distributions

在工况②的条件下，浆液进入后首先驱替分支 C 内的水，随后进入交叉口，除进入 B、D 两个出口分之外，还反向进入动水入口分支 A。由于浆液较大的黏性导致其充满交叉口后局部压力大于分支 A 内水的压力，加之分支 A 较为平滑的表面（开度 h=1.821 mm，裂隙表面的粗糙度 Z_2^{3D}=0.50），为反

向驱替创造了条件。浆液集中在裂隙的一侧，呈显著的非均质分布。相比之下，工况①条件下，注浆流量较小时，浆液并未反向进入动水注入分支 D，而是主要集中于注浆分支 A 对应的出口分支 B。在平均开度相似的条件下，这与分支 B（h=1.825 mm，Z_2^{3D}=0.52）相较于分支 C 更平滑的表面有关。分支 B 中浆液主要集中在裂隙中间，而分支 D（h=1.826 mm，Z_2^{3D}=0.61）整体粗糙度较大，裂隙空腔呈非均质分布，导致浆液集中在裂隙一侧。总体而言，浆液和水经过粗糙裂隙交叉口时进行重分配，平均开度较大和表面更平滑的裂隙分支具有更强的过流能力，成为浆液的主要渗流路径。

浆液在交叉裂隙内的驱替过程稳定后，动水沿着浆液扩散的外侧流动，在各出口裂隙分支边缘处形成稳定的动水渗流通道。随着注浆流量的增加，在动水流量不变的情况下，动水过水断面宽度减小，从而导致断面区域内流速增大。这表明交叉裂隙内浆液与动水的流动存在竞争关系：由于浆液更大的黏性，在相同注入流量的条件下，原有的动水通道被浆液占据，动水仅从边缘处较小的通道流动。动水流速越快，对浆液的冲刷作用越大，注浆封堵的效果越差，在相同条件下则需更大的注浆流量才能达到预期效果。

4.4 浆液扩散全过程演化特征

在静水条件下，浆液沿裂隙内部通道不断推进同时驱替水，直至完全充满整个裂隙。然而，在动水条件下，裂隙内部始终存在动水的流动通道，致使浆液并不能完全充满整个裂隙，如图 11 所示（图中 u、v 代表像素坐标轴）。在平板交叉模型中，浆液总体以平推的方式均匀进入各裂隙分支，仅在两个出口分支的驱替前缘产生细微波动。在粗糙交叉模型中，注浆开始后，浆液从裂隙入口处均匀地进入裂隙空腔，形成稳定的驱替前缘。随后，浆液逐渐填充裂隙开度较大的空间，此时浆液的剪切速率较小，黏度较高，因此在黏性压降的作用下，浆液具有稳定的驱替界面；随着驱替过程的进行，浆液通过优势渗流通道快速渗流，剪切速率增大、黏度降低，浆液的驱替界面表现出明显的“黏性指进”现象，浆液在裂隙内接触区附近出现绕流。

浆液体积分数，即某一时刻浆液体积占裂隙分支内空隙总体积的比值，可以描述浆液在裂隙中的扩散程度，用 0～1 之间的值来表示。计算时根据可中各分支的浆液体积分数演化如图 12 所示。在浆-水流量比为 1:1 的条件下，每个裂隙分支在浆液进入的初期都经历一个快速扩散的过程，随着时间的推移，裂隙空腔逐渐被浆液充填，体积分数趋于一

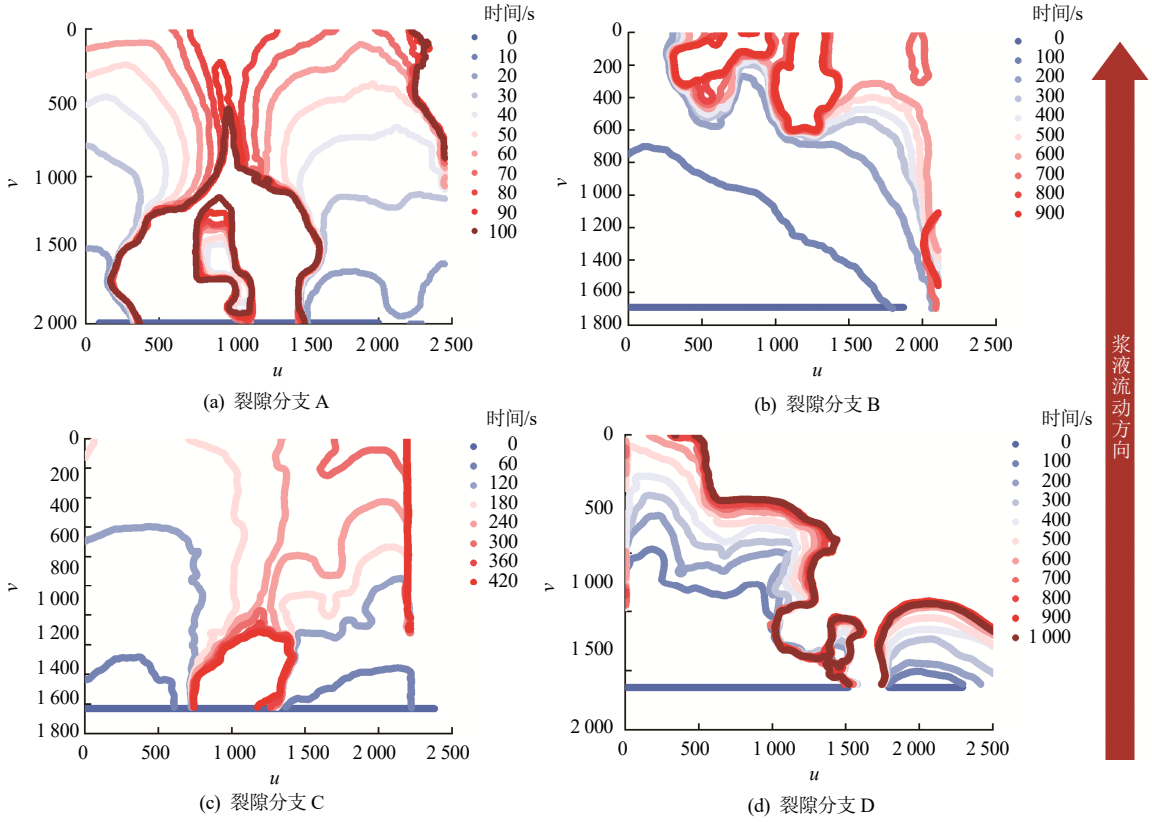
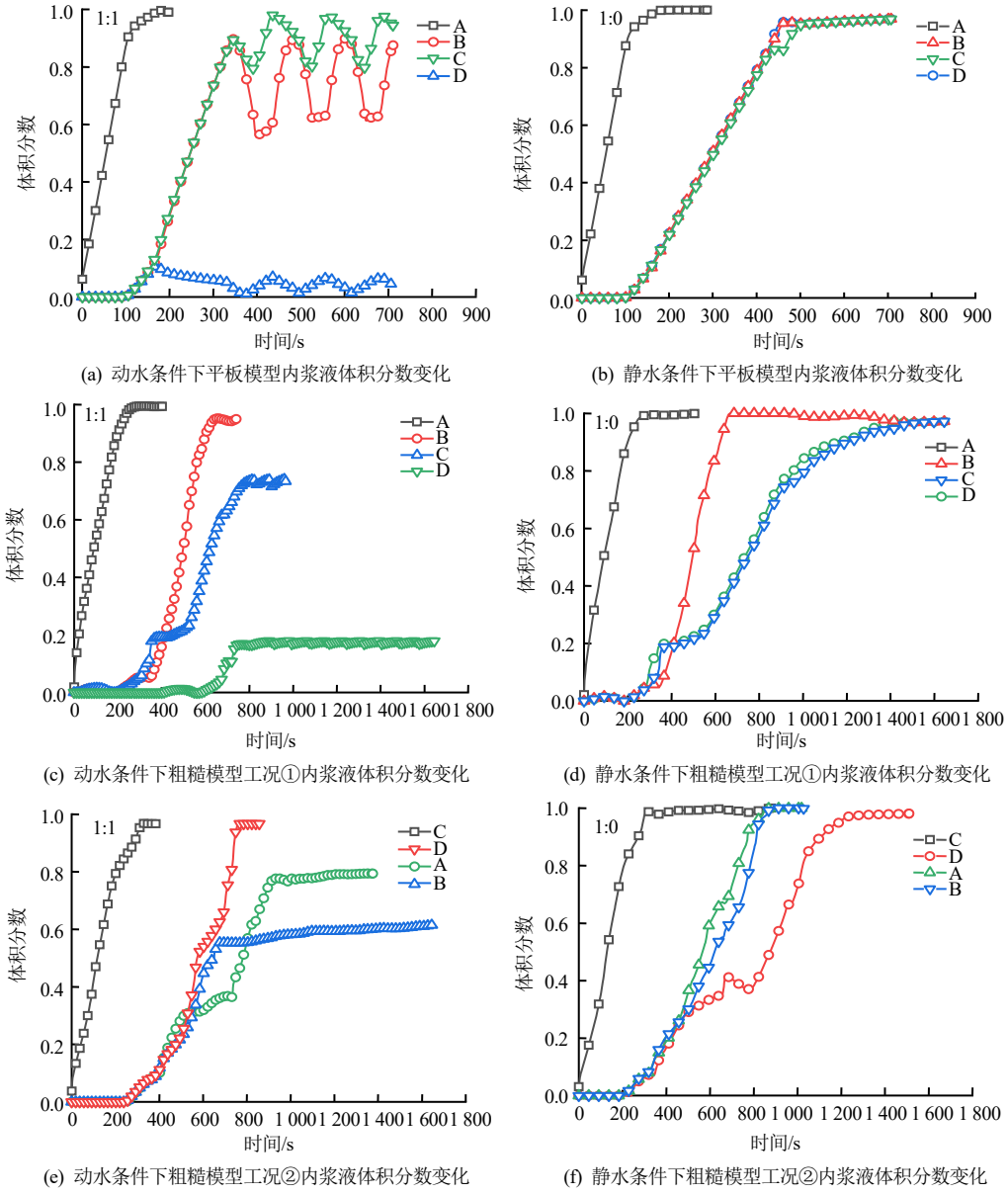


图 11 不同时刻下浆液的扩散形态

Fig.11 Diffusion patterns of grout at different moments

个稳定值。在平板模型中，注浆初期浆液快速填充位于注浆端的 A 分支；随后浆液进入裂隙交叉口重新分配，同时进入其余各裂隙分支，各分支体积分数呈线性增长；由于动水压的影响，大量浆液进入注水相对端的 C 分支，因此 C 分支的体积分数略高于 B 分支，动水主要由 B 分支流出裂隙；位于注水端的 D 分支与出口端分支相同，在 100 s 时有少量浆液进入，这表明对于平行板交叉裂隙，在恒定注浆流量的情况下，浆液在交叉口处均匀分配进入各裂隙分支，逐渐驱替裂隙内的动水。有趣的是，在交叉口处，浆液与动水存在一个交替优先流入某出口分支的现象，导致位于出口端的 B、C 分支的体积分数产生互补的循环波动。这是由于流体在惯性作用下优先沿直线流入对应的出口分支，堵塞垂直流入的另一流体导致压力积累，在达到一定阈值后压力释放，两种流体角色互换，进入下一个周期，形成“淤积–消散”的扩散模式，这一机制也通过可视化图像得到了确认。



(a) 动水条件下平板模型内浆液体积分数变化　(b) 静水条件下平板模型内浆液体积分数变化

(c) 动水条件下粗糙模型工况①内浆液体积分数变化　(d) 静水条件下粗糙模型工况①内浆液体积分数变化

(e) 动水条件下粗糙模型工况②内浆液体积分数变化　(f) 静水条件下粗糙模型工况②内浆液体积分数变化

图 12　不同裂隙分支驱替过程中浆液体积分数演化

Fig.12　Grout volume fraction evolutions in different fracture branches during displacement

对于粗糙交叉裂隙，在工况①下，位于注浆端的分支 A 最先被快速充填；相对的 B 分支直到注浆开始约 200 s 时才开始有浆液进入，充填率在约 600 s 时趋于稳定；从约 200 s 开始，B、C 分支之间出现竞争性驱替，在 B 分支的体积分数近似直线增长的过程中，C 分支的体积分数阶段性上升直至稳定，表明与注浆分支平行连接的分支动水对浆液的阻滞作用更小；直到其他分支达到稳定的充填状态时（约

600 s）时浆液才开始进入 D 分支（注水端），且整体充填率偏低。由于动水作用的影响，各个分支的体积分数差异显著，注浆端的 A 分支受动水影响最小，其最终体积分数接近于 1.0，而 D 分支的最终体积分数小于 0.2，表明浆液对注水分支的反向驱替作用较弱。B 分支的体积分数大于 C 分支，与平板模型结果相反，表明了粗糙度的控制作用。同样地，在工况②下，位于注浆端的 C 分支最终体积分数接近 1，然而其注水端 A 分支的体积分数大于 0.5。这是由于A分支在裂隙交叉口处的开度大于其注水端的开度（交叉处开度为 2.35 mm，注水端开度为 1.36 mm），在同样流速的条件下，浆液的压力大于动水，因此浆液优先驱替靠近裂隙交叉口处开度较大的优势通道，其余部分为动水的流动通道。

然而在浆−水流量比为 1: 0 的条件下，浆液快速充满 A 分支到达裂隙交叉口，且充满 A 分支所用的时间与浆−水流量比为 1:1 的条件下的时间基本相同，这表明垂直方向注浆端分支基本不受水平方向动水的影响。与动水条件下相同，受裂隙几何特征的影响，浆液在到达裂隙交叉口后向其余 3 个分支扩散，逐渐驱替裂隙内的水。在平板模型中，浆液向 3 个分支均匀扩散，3 个分支的扩散速率基本相同，整个裂隙模型的充填率在 500 s 左右达到稳定。在粗糙模型中（以工况①为例），由于分支 B 具有更强的过流能力，浆液优先向垂直方向的 B 分支扩散，此时 B 分支的扩散速率大于 C、D 分支，这与在动水条件下是一致的；由于 C、D 裂隙分支具有相似的表面形貌，因此待浆液充满 B 分支后，浆液呈对称性向 C、D 两个分支扩散，整个裂隙模型的充填率在 1 100 s 左右达到稳定。

在动水条件下，浆液在流入交叉口处与动水接触时，两种流体的接触面存在强烈的剪切流动，大量浆液顺着水流方向扩散，因此相较于静水条件，流出整个裂隙的时间更短。其中，浆液首次充满平板模型的时间缩短了 42.5%，首次充满粗糙交叉裂隙的时间缩短了 45.0%。浆液在粗糙裂隙中产生的摩擦压降使得浆液黏度降低，更易受动水冲刷作用的影响。

5 结 论

本研究基于真实裂隙表面形貌数据，建立三维交叉裂隙模型，开展可视化试验和高精度数值模拟研究不同浆−水流量比条件下的浆液驱替扩散规律。主要结论如下：

（1）注浆开始后，注浆压力快速线性增长，在浆液前沿突破交叉口时表现出短暂的平台期，随后持续增大直到达到稳定值。注浆前期浆液具有稳定的驱替界面，随着驱替过程的进展，驱替界面表现出明显的“黏性指进”现象。粗糙裂隙内开度分布的不均匀性特别是接触面的存在是形成浆液不均匀扩散的主要原因，其次是动水的影响。

（2）交叉口不规则的几何形貌和各分支内的空腔几何特征共同控制浆液在交叉裂隙内的驱替行为。浆液不仅在单个分支内沿优势渗流通道快速驱替动水，在到达交叉口后也优先选择导水性强的分支扩散，导致复杂的流体体积分数演化。窜流混合越充分，出口端的浆液体积分数越接近；优势渗流通道越显著，浆液的驱替效果越好。

（3）对于 JRC 值为 5～6 的粗糙交叉裂隙模型，在浆−水流量比 1:1 的条件下采用传统的平行平板模型计算其内的注浆过程将低估注浆压力 30%以上，且该偏差随流量比的增加而增大。浆液在动水作用下流出裂隙的时间相较静水条件更短，但在动水的影响下需延长注浆时间来提升小空隙内的驱替效果。

本研究考虑的粗糙度范围较小，而建立裂隙粗糙度与注浆压力或流量的定量关系是评价现场岩体裂隙网络内浆液扩散行为的关键，也是今后研究的重点。

参 考 文 献

[1] 高圣元. 基于宾汉姆流体的微裂隙岩体注浆扩散影响机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 2): 3492-3500.
GAO Sheng-yuan. Analysis on spreading mechanism of fractured rock groutingprocess based on Bingham fluid. [J] **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Suppl.2): 3492-3500.

[2] KHAYAT K H J C, COMPOSITES C. Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials — an overview[J]. **Cement and Concrete Composites**, 1998, 20(2-3): 171-188.

[3] LACHEMI M, HOSSAIN K, LAMBROS V, et al. Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste[J]. **Cement and Concrete Research,** 2004, 34(2): 185-193.

[4] ROSQUOëT F, ALEXIS A, KHELIDJ A, et al. Experimental study of cement grout: Rheological behavior and sedimentation[J]. **Cement and Concrete Research**, 2003, 33(5): 713-722.

[5] CURCIO F, DEANGELIS B. Dilatant behavior of super

plasticized cement pastes containing metakaolin[J]. **Cement and Concrete Research,** 1998, 28(5): 629-634.

[6] CYR M, LEGRAND C, MOURET M J C, et al. Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives[J]. **Cement and Concrete Research,** 2000, 30(9): 1477-1483.

[7] BARNES H. Shear-thickening ("dilatancy") in suspensions of nonaggregating solid particles dispersed in Newtonian liquids[J]. **Journal of Rheology**, 1989, 33(2): 329-366.

[8] YAHIA A, KHAYAT K. Analytical models for estimating yield stress of high-performance pseudoplastic grout[J]. **Cement and Concrete Research**, 2001, 31(5): 731-738.

[9] ATZENI C, MASSIDDA L, SANNA U. Comparison between rheological models for Portland cement pastes[J]. **Cement and Concrete Research**, 1985, 15(3): 511-519.

[10] 章敏, 王星华, 汪优. Herschel-Bulkley 浆液在裂隙中的扩散规律研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 815-820.
ZHANG Min, WANG Xing-hua, WANG You. Diffusion of Herschel-Bulkley slurry in fractures[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(5): 815-820.

[11] 杨仙, 卢伟, 金新, 等. 基于分形理论的赫巴流体在多孔介质中的渗流模型[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(3): 122-127.
YANG Xian, LU Wei, JIN Xin, et al. Fractal theory-based seepage model of Hershel-Bulkley fluid in porous medium[J]. **Coal Geology & Exploration,** 2020, 48(3): 122-127.

[12] DI FEDERICO V, LONGO S, KING S, et al. Gravity-driven flow of Herschel-Bulkley fluid in a fracture and in a 2D porous medium[J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2017, 821: 59-84.

[13] HAKANSSON U. Rheology of fresh cement-based grouts[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 1995.

[14] 张乐, 杨志兵, 李东奇, 等. 浆液在透明复制裂隙中驱替行为的可视化试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(6): 1708-1718.
ZHANG Le, YANG Zhi-bing, LI Dong-qi, et al. Investigation into displacement behavior of grout in a transparent fracture replica through visualized experiments[J]. **Rock and Soil Mechanics,** 2023, 44(6): 1708-1718.

[15] CASTRO A, RADILLA G. Flow of yield stress and Carreau fluids through rough-walled rock fractures: prediction and experiments[J]. **Water Resources Research,** 2017, 53(7): 6197-6217.

[16] 李博, 刘蓉蓉, 邹良超. 单裂隙内浆液基本流动规律的理论、试验、模拟对比分析[J]. 岩土力学, 2024, 45(增刊 1): 751-760.
LI Bo, LIU Rong-rong, ZOU Liang-chao. Theoretical, experimental and numerical analysis of fundamental flow laws of grout in single rock fractures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(Suppl.1): 751-760.

[17] BURGOS G R, ALEXANDROU A N. Flow development of Herschel–Bulkley fluids in a sudden three-dimensional square expansion[J]. **Journal of Rheology**, 1999, 43(3): 485-498.

[18] 罗平平, 王兰甫, 范波, 等. 基于 MBM 随机隙宽单裂隙浆液渗透规律的模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 309-316.
LUO Ping-ping , WANG Lan-fu, FAN Bo, et al. Numerical simulation of infiltration laws of grouts in random aperture based on multi-fractional Brownian motion[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(2): 309-316.

[19] 李训刚, 唐超, 张帅, 等. 基于纳米材料的水泥浆液粗糙裂隙注浆数值模拟[J]. 矿业研究与开发. 2021, 41(6): 66-71.
LI Xun-gang, TANG Chao, ZHANG Shuai, et al. Numerical simulation of rough fracture grouting of cement slurry based on nanomaterials[J]. **Mining Research and Development,** 2021, 41(6): 66-71.

[20] 杨坪, 孙雪青. 动水环境下粗糙单裂隙注浆数值模拟. 地下空间与工程学报[J]. 2017, 13(4): 950-954.
YANG Ping, SUN Xue-qing. Rough single fracture grouting numerical simulation in hydrodynamic environment[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2017, 13(4): 950-954.

[21] 魏建平, 姚邦华, 刘勇, 等. 裂隙煤体注浆浆液扩散规律及变质量渗流模型研究[J]. 煤炭学报. 2020, 45(1): 204-212.
WEI Jian-ping, YAO Bang-hua, LIU Yong, et al. Grouting fluid diffusion law and variable mass seepage model for fractured coal[J]. **Journal of China Coal Society**, 2020, 45(1): 204-212.

[22] 田开铭. 裂隙水交叉流的水力特性[J]. 地质学报, 1986(2): 202-214.
TIAN Kai-ming. Hydraulic characteristics of cross-flow in fracture water[J]. **Acta Geologica Sinica**, 1986(2): 202-214.

[23] 速宝玉, 詹美礼, 郭笑娥. 交叉裂隙水流的模型实验研究[J]. 水利学报, 1997(5): 2-7.
SU Bao-yu, ZHAN Mei-li, GUO Xiao-e. Model experimental study on cross fracture flow[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1997(5): 2-7.

[24] WILSON C R, WITHERSPOON P A. Flow interference effects at fracture intersections[J]. **Water Resources Research**, 1976, 12(1): 102-104.

[25] MOURZENKO V, YOUSEFIAN F, KOLBAH B, et al. Solute transport at fracture intersections[J]. **Water Resources Research,** 2002, 38(1): 1-14.

[26] JOHNSON J, BROWN S, STOCKMAN H. Fluid flow and mixing in rough-walled fracture intersections[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 2006, 111(B12): 1-16.

[27] 刘日成, 李博, 蒋宇静, 等. 三维交叉裂隙渗流特性的实验和数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 2): 3813-3821.
LIU Ri-cheng, LI Bo, JIANG Yu-jing, et al. Experimental and numerical study of hydraulic properties of 3D crossed fractures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Suppl.2): 3813-3821.

[28] LI B, XU J J, ZHONG J, et al. Effects of surface roughness and shear processes on solute transport through 3D crossed rock fractures[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,** 2023, 170: 105529.

[29] 崔溦, 王利新, 江志安, 等. 基于修正立方定律的岩体粗糙裂隙网络注浆过程模拟研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2250-2258.
CUI Wei, WANG Li-xin, JIANG Zhi-an, et al. Numerical simulation of grouting process in rock mass with rough fracture network based on corrected cubic law[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(8): 2250-2258.

[30] KOSAKOWSKI G, BERKOWITZ B. Flow pattern variability in natural fracture intersections[J]. **Geophysical Research Letters**, 1999, 26(12): 1765-1768.

[31] ZOU L C, LI B, MO Y Y, et al. A high-resolution contact analysis of rough-walled crystalline rock fractures subject to normal stress[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2020, 53(5): 2141-2155.

[32] LIPSCOMB G, DENN M. Flow of Bingham fluids in complex geometries[J]. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, 1984, 14: 337-346.

[33] SHAMU T J, HAKANSSON U. Rheology of cement grouts: on the critical shear rate and no-slip regime in the Couette geometry[J]. **Cement and Concrete Research**, 2019, 123: 105769.

[34] 蔡成涛, 王峰. 基于双目相机的直线运动轨迹快速测量算法[J]. 激光与光电子学进展. 2019, 56(5): 051502.
CAI Cheng-tao, WANG Feng. Fast trajectory measurement algorithm for linear motion based on binocular camera[J]. **Laser & Optoelectronic Progress,** 2019, 56(5): 051502.

[35] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. **Automatica,** 1975, 11(285-296): 23-27.

[36] XIA C, HUANG H, WANG T, et al. Segmentation of infrared image using fuzzy thresholding via local region analysis[C]//5th International Congress on Image and Signal Processing. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012: 706-710.

[37] TONG T, CAI Y, SUN D W, et al. The combination of local fuzzy entropy and gray level difference-based thresholding segmentation[J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2012, 220: 1288-1291.

[38] PAI P Y, CHANG C C, CHAN Y K, et al. An image segmentation-based thresholding method[J]. **Journal of Imaging Science & Technology**, 2012, 56(3):1-20.

[39] ABDULLAH S L S, JAMIL N. An accurate thresholding-based segmentation technique for natural images[C]//2012 IEEE Symposium on Humanities, Science and Engineering Research. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012: 919-922.

[40] 孙继平, 靳春海, 曹玉超. 基于视频图像的矿井水灾识别及趋势预测方法研究[J]. 工矿自动化, 2019, 45(7): 1-4.
SUN Ji-ping, JIN Chun-hai, CAO Yu-chao. Research on mine flood identification and trend prediction method based on video image[J]. **Industry and Mine Automation,** 2019, 45(7): 1-4.

[41] 余博, 郭雷, 钱晓亮, 等. 一种新的自适应双边滤波算法[J]. 应用科学学报. 2012, 30(5): 517-523.
YU Bo, GUO Lei, QIAN Xiao-liang, et al. A new adaptive bilateral filtering[J]. **Journal of Applied Sciences-Electronics and Information Engineering,** 2012 30(5): 517-523.

[42] BANTERLE F, CORSINI M, CIGNONI P, et al. A low-memory, straightforward and fast bilateral filter through subsampling in spatial domain[J]. **Computer Graphics Forum**, 2012, 31(1): 9-32.

[43] MITSOULIS E. Numerical simulation of calendering viscoplastic fluids[J]. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, 2008, 154(2-3): 77-88.

[44] 李博, 王晔, 邹良超, 等. 岩石裂隙内浆液−水两相流可视化试验与驱替规律研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(9): 1608-1616.
LI Bo, WANG Ye, ZOU Liang-chao, et al. Displacement laws of grout-water two-phase flow in a rough-walled rock fracture through visualization tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering,** 2022, 44(9): 1608-1616.