

岩体交叉裂隙几何特征对溶质运移的影响

乔丽苹^{1,2}, 庞利磊¹, 王者超^{1,2}, 任梦梓¹

(1. 辽宁省油气地下储存工程研究中心, 辽宁 沈阳 110004; 2. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 交叉裂隙溶质运移特征是岩体裂隙网络溶质运移的基础。对流与水动力弥散是非反应性溶质运移的主要控制机制, 佩克莱数被用来评估两者在非反应性溶质运移过程中的占比影响。本文通过改变注入流体的流速, 改变交叉裂隙的粗糙度、交叉角、开度比等几何特征, 采用有限元数值分析获得了佩克莱数与交叉裂隙几何特征对溶质运移特性的影响规律。研究表明: 随流体流速增大, 溶质运移由弥散主导转向对流主导, 实际工程中全面考虑弥散效应有助于准确评估交叉处溶质的混合程度; 粗糙度仅影响溶质到达出口处的运移时间; 交叉角、开度比通过影响溶质分子扩散到不同出口分支的概率、优势流的流动路径, 显著改变了交叉处溶质的混合程度; 不同流量比通过影响交叉处流向出口分支的优势流位置, 影响了交叉处溶质的混合。研究结论可为油气地下储存、垃圾填埋、核废料处置等地下工程中地下水污染物的防控治理提供理论依据。

关键词: 交叉裂隙; 溶质运移; 佩克莱数; 水动力弥散

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A **文章编号:**

作者简介: 乔丽苹 (1982-), 女, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究。E-mail: qiaoliping@mail.neu.edu.cn

The influence of geometric characteristics of intersecting fractures in rock mass on solute transport

Qiao Liping^{1,2}, Pang Lilei¹, Wang Zhechao^{1,2}, Ren Mengzi¹

(1. Liaoning Provincial Research Center on Underground Storage Engineering, Shenyang 110004, China; 2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The solute transport characteristics of intersecting fracture are the basis of solute transport in fractured rock mass. Advection and hydrodynamic dispersion are the main controlling mechanisms of non-reactive solute transport, and Péclet number is used to evaluate their proportions in the process of non-reactive solute transport. By changing the flow velocity of the injected fluid and the geometric characteristics of the intersecting fracture such as roughness, intersecting angle and aperture ratio, the influences of Péclet number and intersecting fracture geometric characteristics on solute transport characteristics are obtained by finite element numerical analysis. The results show that with the increase of fluid flow velocity, solute transport changes from dispersion-dominated to advection-dominated. By comprehensively considering the dispersion effect in practical engineering, it is helpful to accurately evaluate the mixing degree of solute at the intersection. Roughness primarily affects the solute migration time towards outlets. The intersecting angle and aperture ratio significantly alter the mixing degree of solute at the intersections by affecting the probability of solute molecules diffusing to different outlet branches and the flow path of the dominant flow. Different flow ratios also affect the mixing of solutes at the intersection by influencing the dominant flow positions towards the outlet branches. The research conclusions can provide a theoretical basis for the prevention and control of groundwater pollutants in underground engineering such as oil and gas underground storage, landfill, and nuclear waste disposal.

Key words: intersecting fracture; solute transport; Péclet number; hydrodynamic dispersion

0 引言

岩体由基岩和裂隙组成, 由于大多数基岩自身的低渗透性, 裂隙成为地下水流动的主要通道^[1-2], 并决定了区域内的溶质运移特性。交叉裂隙是岩体裂隙网络的主要组成部分之一, 其交叉处是裂隙连通和溶质

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42177157); 辽宁省应用基础研究计划 (2023JH2/101300153, 2022JH2/101300127); 辽宁省科学技术计划项目“揭榜挂帅” (2023JH1/10400003); 沈阳市科学技术计划项目 (23-407-3-25, 22-322-3-17)
收稿日期:

运移交汇的部位。流体中的溶质沿渗流路径在裂隙交叉处混合，交叉裂隙的几何特性，包括粗糙度、交叉角、开度比等因素显著影响了裂隙岩体中的溶质运移过程^[3-4]。

裂隙岩体的溶质运移过程是复杂的，对流与水动力弥散是非反应性溶质运移的两种主要物理机制^[5]。对流是指溶质以平均流体速度沿流线范围内的运移，水动力弥散又分为机械弥散和分子扩散^[6]，指溶质向周边低浓度位置的弥散行为，通过计算佩克莱数（Pe数）来比较两者在裂隙交叉处溶质运移过程中的主导地位。经典混合模型，包括完全混合模型和流线路径模型^[7]，通过对裂隙交叉处溶质再分配过程的简单处理，被用于模拟裂隙岩体中的溶质运移行为，并通过引入混合比（Mixing ratio，记作 M_r ）来描述裂隙交叉处的溶质混合程度，从而得到溶质运移的量化分析结果。学者们通过对裂隙出口处溶液采用色差分析、电导率测量等手段，开展了交叉裂隙溶质运移试验^[8-11]，研究了两种经典混合模型的临界适用条件，发现其与 Pe 数的取值有关。

宏观的试验分析并不能解释交叉处的微观混合机理，伴随着科学研究的深入以及相关技术的发展，学者们开展了交叉裂隙溶质运移的数值模拟研究。Philip^[12]对比了不同流动方式对溶质运移的影响，指出流线路径模型的局限，认为这种局限与交叉处的流量分配有关。Berkowitz^[13]假设溶质在足够长的裂隙内充分扩散，模拟了不同流量分配下的溶质运移试验，发现裂隙交叉处的混合过程与局部 Pe 数相关。Robinson 和 Gale^[14]发现裂隙交叉角度影响交叉处的溶质混合。Stockman^[15]的研究结果表明裂隙入口和出口处的边界条件对 M_r 有较大的影响。Park 和 Lee^[16]发现由于流线浓度之间的差异导致的扩散会引起混合加速现象，指出 M_r 为对流速度、扩散系数和溶质在裂隙交界处停留时间的函数。Hull 等^[10]采用试验与模拟相结合的方法，发现裂隙中存在的非常短的横向距离与高浓度梯度结合，会加速由浓度差引起的扩散行为，表明考虑弥散作用有助于准确预测裂隙中的溶质运移。

目前针对岩体裂隙的溶质运移研究，多针对单裂隙分析相关机理，继而将单裂隙结果应用到对岩体裂隙网络溶质运移的研究；随着研究深入，部分学者开展了典型交叉裂隙的溶质运移研究，多集中于交叉处的某一几何特性进行考虑，且多为定性描述。同时，对岩体裂隙中弥散方面的考虑多集中于分子扩散方面，而水动力弥散实际是由分子扩散和机械弥散共同主导，忽略机械弥散可能会导致对溶质运移预测结果的偏差。

针对上述问题，本研究通过改变流体流速以控制 Pe 数大小，改变交叉裂隙的粗糙度、交叉角、开度比

等几何参数，采用有限元数值分析方法研究不同流速与交叉裂隙几何特征对非反应性溶质运移特性的影响规律，以期为油气地下储存、垃圾填埋、核废料处置等相关地下工程中的地下水污染防控治理等问题提供相关理论依据。

1 溶质运移模型及工况设置

1.1 控制方程

考虑粗糙裂隙内的溶质运移过程，假设裂隙内流体不可压缩且黏性系数恒定，可以采用连续性方程和 Navier-Stokes 方程描述流体运动状态，表示为下式^[7]：

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \mu \nabla^2 \mathbf{u} = -\nabla P \quad (2)$$

式中： $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$ 为流体密度； $\mathbf{u}(\text{m}/\text{s})$ 为速度矢量； $\mu(\text{Pa} \cdot \text{s})$ 为动力黏性系数； $P(\text{Pa})$ 为压力，等于流体压力和重力之和。

裂隙中溶质运移过程多采用对流扩散方程进行描述，表示为^[7]：

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla c - \nabla \cdot D(\nabla c) = 0 \quad (3)$$

式中： $c(\text{mol}/\text{m}^3)$ 是单位体积流体中所含溶质的物质的量； $t(\text{s})$ 是时间； $D(\text{m}^2/\text{s})$ 为水动力弥散系数，定义为机械弥散系数和分子扩散系数之和，即^[6]：

$$D = \alpha_L v + D_m \quad (4)$$

式中： $\alpha_L(\text{m})$ 为纵向弥散度； $D_m(\text{m}^2/\text{s})$ 为分子扩散系数，本文流体中的溶质视为氯离子^[7]； $v(\text{m}/\text{s})$ 是同一条分支裂隙中的平均流速。当不考虑水动力弥散过程中的机械弥散，即仅考虑分子扩散时， $D = D_m$ 。各参数取值见表 1。

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

参数	取值
流体密度 ρ (kg/m^3)	9.997E2
动力黏性系数 μ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	1.307E-3
分子扩散系数 D_m (m^2/s)	2.03E-9
纵向弥散度 α_L (m)	1E-6

本研究使用 Comsol Multiphysics 对 Navier-Stokes 方程和对流扩散方程进行耦合求解。通过对裂隙交叉处周边的网格进行细化，直至获得稳定解。

1.2 物理模型和边界条件

天然裂隙中常见的裂隙交叉通常表现为三支和四分支形式^[17]。本研究主要考虑四分支交叉裂隙对溶质运移的影响，假设裂隙位于渗透率非常低的完全饱和的岩石基质中，如花岗岩，基质渗透率对溶质运移的影响可忽略，即仅考虑裂隙内的溶质运移过程。

图 1 为四分支交叉裂隙示意图，图中变量定义见表 2，流体流动和溶质注入采用连续型流动^[13]方式。

具体而言，将裂隙分支 1 和分支 2 设定为入口边界，在入口边界设定注入流量 q_1 、 q_2 。为减少边界效应影响，所有模拟均采用 Comsol 提供的层流入口流入条件，即认为流体流动处于层流范围。出口分支 3、4 设置为无压力 ($p=0$) 边界条件。裂隙壁面设置为无滑移边界条件 ($u=0$)。在裂隙分支 1 的入口处连续注入恒定浓度 $c_1 = 1\text{mol/m}^3$ 的溶液，裂隙分支 2 的入口处连续注入无溶质的普通溶液，即 $c_2 = 0\text{mol/m}^3$ 。其他边界均为无通量边界，即 $n \cdot \nabla c = 0$ (n 是边界的法线向量)。初始时整个裂隙系统中无溶质。

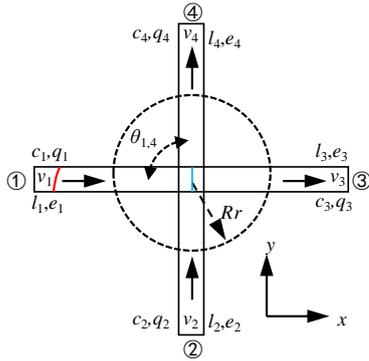


图 1 四分支交叉裂隙示意图

Fig. 1 Schematic diagram of four branch intersecting fracture

表 2 模型变量表

Table 2 Model Variable Table

变量符号	物理意义	下标取值	单位
q_i	第 i 分支流体流量	$i = 1, 2, 3, 4$	m^3/s
c_i	第 i 分支溶质浓度	$i = 1, 2, 3, 4$	mol/m^3
v_i	第 i 分支平均流速	$i = 1, 2, 3, 4$	m/s
e_i	第 i 分支平均开度	$i = 1, 2, 3, 4$	mm
l_i	第 i 分支长度	$i = 1, 2, 3, 4$	mm

为便于比较，除另有说明，浓度与时间均进行归一化处理， $c' = c/c_1$ ， $t' = t/t_0$ ，其中 t_0 是流体流过裂隙的平均停留时间 ($t_0 = l/v$ ， l 是裂隙长度)。

为了从宏观角度描述交叉处溶质的混合以及溶质经交叉处从不同出口流出的分配过程，引入 M_r 进行量化，其表示出口分支 3 中溶质物质的量与进入交叉处的溶质总量的比值，被定义为^[18]：

$$M_r = \frac{q_3 c_3}{q_3 c_3 + q_4 c_4} \quad (5)$$

在完全混合模型中，溶质经不同入口分支流入并在交叉处充分混合，认为其完全由水动力弥散主导，此时经不同出口流出的溶液浓度均相同， M_r 与出口流量的比值有关；在流线路径模型中，认为溶液在交叉处无混合，即由对流控制溶质运移过程，若此时 $q_3 = q_4$ ，则 M_r 与各分支出口处浓度的比值有关。

1.3 工况设置

在非反应性溶质运移过程中，对流和水动力弥散相互耦合。为了比较这两种机理的影响，引入 Pe 数进

行描述。Pe 数表示对流相对于水动力弥散传质大小的比值，定义为^[7]：

$$\text{Pe} = \frac{v \cdot \bar{e}}{D} \quad (6)$$

式中： v (m/s) 为交点处的流体特征速度，取裂隙沿流动方向速度的均值； \bar{e} (m) 为两条入口分支裂隙平均开度。

当裂隙开度与水动力弥散系数不变的情况下，随流体流速增加，Pe 数增大，对流在溶质运移过程中的影响比重也越大，水动力弥散作用减小；流速降低，Pe 数减小，水动力弥散在溶质运移中的影响也越大。本研究主要控制入口分支的流速 v 来改变 Pe 数的大小，Pe 数大小控制范围在 10^{-5} 至 10^5 之间。

裂隙分支长度与开度的比值，即裂隙分支纵横比会影响溶质运移特征^[19-20]，为了选择合适的裂隙尺度进行研究，首先研究了相同 Pe 数、各分支平均开度相同情况下，不同裂隙分支纵横比对 M_r 的影响，结果如图 2 所示。可以看出，当裂隙分支纵横比大于 10 时，裂隙分支的尺寸效应对溶质运移的影响可忽略，为便于研究，本文将交叉处研究区域划定为分支最大开度的 10 倍，即图 1 所示的 R_r 范围。

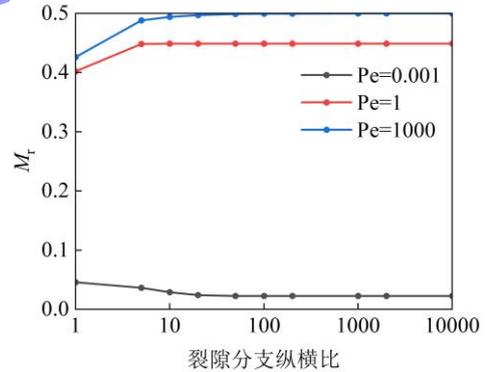


图 2 M_r 与裂隙分支纵横比的关系

Fig. 2 Relationship between M_r and fracture branch aspect ratio

此外，当裂隙分支纵横比大于 10 时，在各分支平均开度相同的情况下，裂隙开度数值上的差异对交叉处溶质分配的影响有限。经地质调查，岩体中天然裂隙分支的纵横比基本满足 10 倍最大开度要求^[21]，故可忽略由开度差异引起的交叉处混合程度变化。

本研究通过改变图 1 中四分支裂隙的几何参数，研究粗糙度、交叉角、开度比等因素对溶质运移特性的影响。四个分支 1、2、3、4 的平均开度分别为 e_1 、 e_2 、 e_3 和 e_4 ，交叉角定义为 $\theta_{1,4}$ ，即分支 1 与分支 4 的夹角。考虑到典型的四分支交叉裂隙地质条件^[22]，可认为分支 1 和 3 的平均开度一致，分支 2 和 4 的平均开度一致，即： $e_1 = e_3$ ， $e_2 = e_4$ 。本研究裂隙开度 e_i 范围为 0.1~1mm，为满足裂隙分支 10 倍纵横比要求，将裂隙各分支长度 l_i 统一确定为 20mm。

常规裂隙粗糙度范围在 0~20 之间^[17]。通过逐次随机累加法，同时添加服从正态分布的随机高程，生成具有不同粗糙度的裂隙点坐标 $z_1(x, y)$ ，后根据平移法，通过预设的开度 e 生成对应裂隙的点坐标 $z_2(x, y + e)$ ， z_1 、 z_2 共同组成具有相应粗糙度的裂隙流动通道，生成单一裂隙通道后，绕裂隙通道中心点旋转一定角度即可得到相应的交叉裂隙。所有工况均控制入口分支注入流体的流量相同。裂隙模型的参数及相应工况设置见表 3。

表 3 工况设置

Table 3 Setting of working conditions

工况组	粗糙度	交叉角	开度 (mm)	
	JRC		$\theta_{1,4} (^{\circ})$	e_1
Pe 数	光滑	90	0.1	0.1
	光滑, 3.9			
	5.2, 8.1			
	10.5, 13.1			
	14.7, 18.8			
粗糙度	光滑	$5k, 1 \leq k \leq 35$ 且 $k \in Z$	0.1	0.1
	0.1			
	0.1			
	0.1			
	0.2			
	0.1			
	0.2			
交叉角	光滑	90	0.1	0.1
	0.1			
	0.1			
	0.2			
	0.5			
	0.6			
	0.5			
开度比	光滑	90	0.1	0.1
	0.1			
	0.2			
	0.5			
	0.6			
	0.5			
	1			

2 结果与分析

2.1 Pe 数的影响

为研究 Pe 数影响交叉裂隙溶质运移的微观机理，定义一个新的无量纲数 (advection dispersion number, 简称 ad)，其表示为裂隙分支 1 中溶液浓度过渡带 (以浓度为 1mol/m^3 的点连接而成，即图 1 中红色曲线) 到交叉处中心 (图 1 中蓝色曲线) 的相对距离，表示为：

$$ad = \sum x_i / (n \cdot l_0) \quad (7)$$

式中： x_i 为模型中过渡带上各点横坐标的绝对值， n 为组成过渡带曲线的点的数目， l_0 为溶质注入口到交叉处中心的直线距离。ad 值越大，说明分子扩散效应越显著，机械弥散、对流效应的影响则越小。

图 3 给出了不同 Pe 数对 ad、 M_r 的影响规律。当 Pe 数较小时，即 $Pe < 0.01$ 时，ad 的值接近 1， M_r 的值则趋近于 0.5，表明此时对流作用可忽略，主要由分子扩散主导交叉裂隙的溶质运移过程。随着 Pe 数的增大 ($0.01 \leq Pe < 0.5$)，可发现 ad 值在快速减小，但此时 M_r 的值仍近似于 0.5，这表明该阶段的溶质运移仍由弥散 (主要为分子扩散) 主导，但机械弥散的效应逐渐增

强。随着 Pe 数继续增大 ($0.5 \leq Pe < 500$)， M_r 逐渐减小，这一阶段的溶质运移过程逐渐由弥散主导转向对流主导，且二者对溶质运移的影响处于同一数量级，此时 ad 的值也随 Pe 数增大而逐渐减小，整体变化幅度较小，表明该阶段的弥散效应逐渐由分子扩散主导转向机械弥散主导。当 $Pe > 500$ 时，对流彻底占据主导地位，机械弥散对交叉处混合的增强幅度有限，分子扩散的影响可忽略。

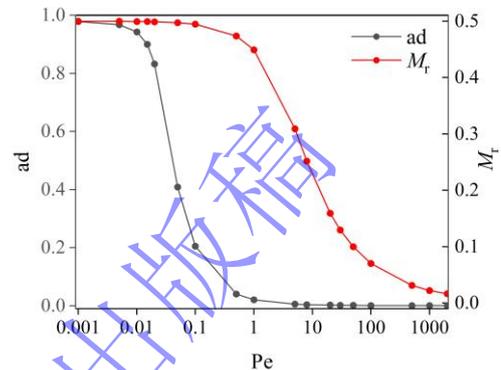


图 3 无量纲 ad 和混合比 M_r 与 Pe 数的关系

Fig. 3 Relationships between ad, M_r and Pe number

图 4 为流线路径模型、完全混合模型、仅考虑分子扩散和考虑水动力弥散不同工况下 M_r 与流体流速的关系。在完全混合模型中， M_r 值为 0.5，流线路径模型中， M_r 为 0。仅考虑分子扩散和考虑水动力弥散两种工况下， M_r 随注入流体流速的增大而减小。这是因为随着流体流速的增大，Pe 数也逐渐增大，对流逐渐主导裂隙内的溶质运移过程，溶质运移模式由在交叉处的完全混合，逐渐转向流线路径运移模式。

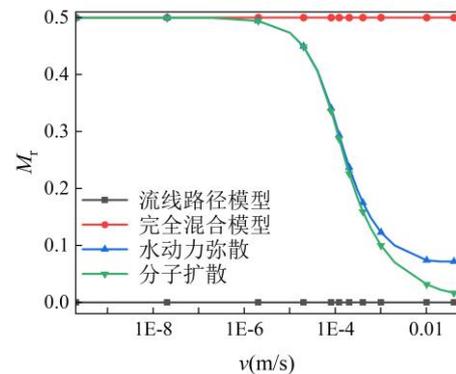


图 4 M_r 与注入流体流速的关系

Fig. 4 Relationship between M_r and injected fluid flow velocity

结合式(6)，在流速较低时 ($v < 1E-5\text{m/s}$)，水动力弥散和分子扩散情况下，Pe 数差别较小 (处于 $Pe < 0.5$ 范围内)，此时机械弥散对溶质运移的影响可忽略；随着流体流速增大 ($v > 1E-5\text{m/s}$)，两组工况下的 Pe 数、 M_r 的值均开始产生差别，特别是当流速达到 $1E-3\text{m/s}$ 时，由于机械弥散显著增强了交叉处的混合，两组工况的 M_r 的值差别明显。当 $v > 1E-5\text{m/s}$ 时，两组工况计算所得的 Pe 数值均不小于 0.5，故可认为当 $Pe \geq 0.5$ 时，

忽略机械弥散将导致计算所得的 Pe 数偏小,从而导致对交叉处混合程度的低估。

实际岩体裂隙中,根据地下水流速计算对应的 Pe 数值约为 1,此时机械弥散对交叉处溶质混合的过程起到一定增强作用。这表明在实际工程问题中,如果忽视了机械弥散的存在,将对最终溶质运移的结果产生低估。同时在后续研究几何特征影响的工况中,考虑到不同工程中裂隙内流体流速有较大差异,因此选择 $Pe=0.001$ (低 Pe 数)、 $Pe=1$ (典型 Pe 数)、 $Pe=1000$ (高 Pe 数) 作为典型工况进行考虑^[23]。

2.2 粗糙度的影响

粗糙度对 M_r 的影响如图 5。相同 Pe 数下,不同粗糙度工况对应的 M_r 的值差别不大,因此相较于光滑交叉裂隙,可认为粗糙度对交叉处溶质分配的影响可忽略。考虑到本文溶质为非反应性溶质,运移过程中溶质彼此之间互不影响,故粗糙度效应仅对溶质运移到各点的时间有影响,对溶质在交叉处的混合程度影响较小。该分析表明,三维情况下的粗糙度效应引起的交叉处混合程度的改变,可能并非原来认为的由沟槽流效应引起的。

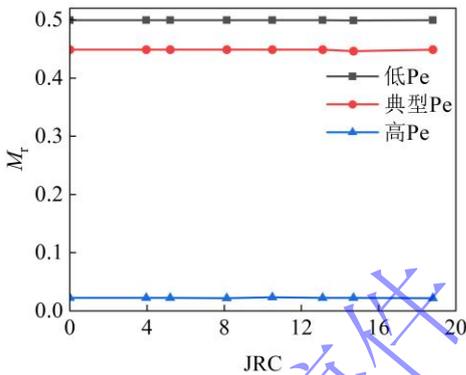


图 5 M_r 与 JRC 关系

Fig. 5 Relationship between M_r and JRC

对不同 Pe 数下,出口分支 3 处的溶液浓度随时间变化曲线进行研究,结果如图 6、图 7、图 8。不同 Pe 数下,出口处的溶质随时间变化曲线均表现出明显的早到和拖尾现象,且粗糙裂隙较光滑裂隙,拖尾现象更加明显。这与三维情况下的研究结论一致^[4]。

低 Pe 数下,分子扩散主导了该阶段的溶质运移,由于交叉处的几何效应以及扩散的无序性,出口处溶质随时间变化呈较明显的拖尾现象。同时,裂隙表面几何形貌的凹凸不平更是对溶质的扩散产生阻碍作用。因此,相较于光滑交叉裂隙,粗糙裂隙内的溶质完全扩散到出口处的时间更久,进而造成更长的拖尾现象。如图 7 和图 8,典型 Pe 数和高 Pe 数下,粗糙交叉裂隙中出口 3 处溶质峰值浓度出现的时间早于光滑裂隙。同时,流体流速的增大也导致部分粗糙处产生涡旋^[24],从而延长了溶质完全到达各裂隙分支出口端的时间,

这表现为粗糙裂隙出口 3 处浓度随时间变化的曲线中,有着更长的拖尾现象。

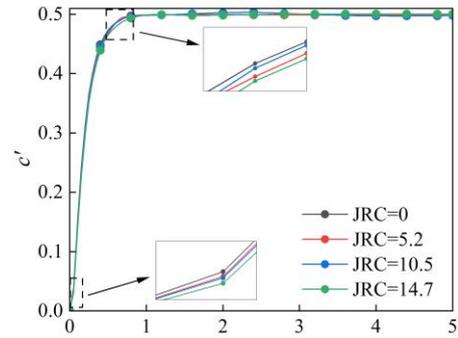


图 6 低 Pe 下分支 3 出口浓度随时间归一化曲线图

Fig. 6 Normalization curve of outlet 3 concentration over time at low Pe

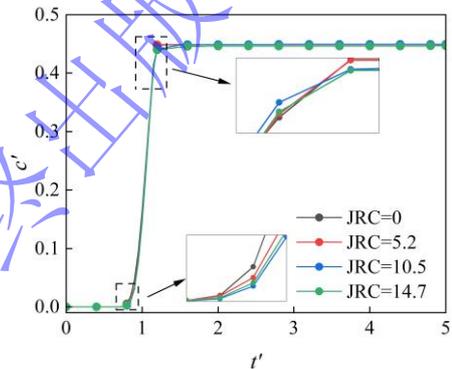


图 7 典型 Pe 下分支 3 出口浓度随时间归一化曲线图

Fig. 7 Normalization curve of outlet 3 concentration over time at typical Pe

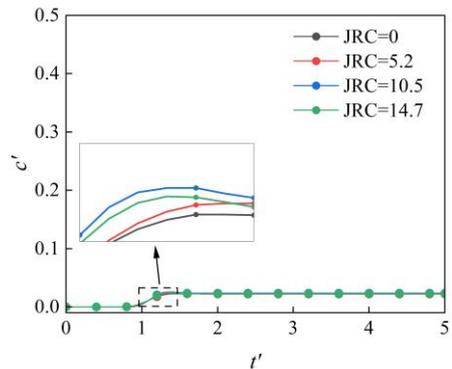


图 8 高 Pe 下分支 3 出口浓度随时间归一化曲线图

Fig. 8 Normalization curve of outlet 3 concentration over time at high Pe

图 9 为光滑裂隙与粗糙裂隙中流体流速图,可以看出,流体在裂隙通道内呈抛物线型向前流动,粗糙裂隙较光滑裂隙,更容易在相应裂隙凹凸段产生局部速度更快的优势流,使得在对流效应下溶质随流体更快的到达各出口处。综上,不同 Pe 数下,粗糙度对交叉处溶质的混合程度影响有限,为提高计算效率,后续分析中,均采用光滑裂隙作为基本模型进行研究。

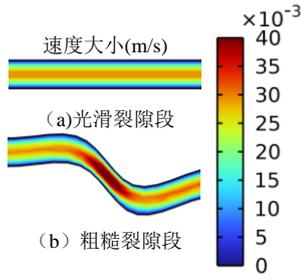


图9 裂隙段内流体流速云图

Fig. 9 Flow velocity cloud image in fracture section

2.3 交叉角的影响

交叉角 $\theta_{1,4}$ 对 M_r 的影响如图 10。低 Pe 数条件下, 当 $\theta_{1,4} \leq 30^\circ$ 时, 随着 $\theta_{1,4}$ 的增大, M_r 有微弱增长趋势, 当 $\theta_{1,4} > 30^\circ$ 时, M_r 值趋于稳定且近似等于 0.5。典型 Pe 条件下, 随着 $\theta_{1,4}$ 的增大, M_r 逐渐增大, 且增长速度逐渐减小, 当 $\theta_{1,4} > 150^\circ$ 时, M_r 值趋于稳定且近似等于 0.5。高 Pe 条件下, 当 $\theta_{1,4} \leq 30^\circ$ 时, M_r 的值变化不大, 值趋近于 0; 随着 $\theta_{1,4}$ 的增大 ($\theta_{1,4} > 30^\circ$), M_r 逐渐增大, 且增长速度呈现缓慢增大的趋势。

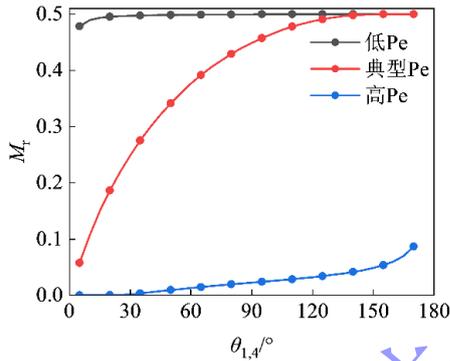


图 10 混合比 M_r 与交叉角 $\theta_{1,4}$ 的关系

Fig. 10 Relationship between M_r and $\theta_{1,4}$

低 Pe 数下, 由于流体流速极小, 此时溶质运移由分子扩散主导。结合图 11 的不同交叉角下交叉处几何形态图, 可以看出当 $\theta_{1,4}$ 较小 ($\theta_{1,4} \leq 30^\circ$) 时, 在交叉处分支 1 与分支 4 的距离比分支 1 到分支 3 的距离更近, 这有利于溶质从分支 1 扩散到分支 4, 从而导致小角度情况下交叉处 M_r 值较小。当 $\theta_{1,4}$ 增大时, 这种由不同分支间距离的差异导致的对溶质进入不同出口分支概率的影响减弱, 从而使得 M_r 的值趋于稳定值。

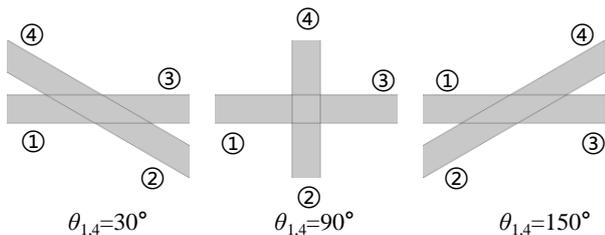


图 11 不同交叉角下交叉处几何形态图

Fig. 11 Geometric shape diagram of intersections at different intersecting angles

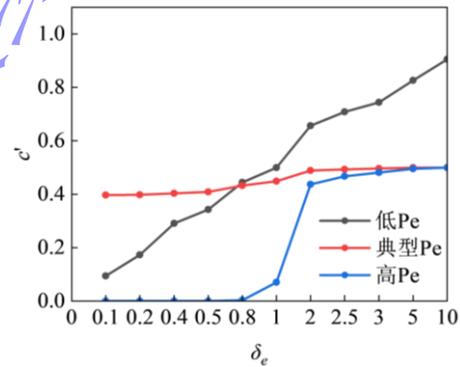
随着流体流速增加, 对流作用逐渐增强, 由于交叉处几何尺度的改变, 不同流体在交叉处汇聚偏转, 产生相应的能量耗散, 这种能量损失随着 $\theta_{1,4}$ 增大而减小^[20], 并相应增强了溶质的机械弥散。

典型 Pe 数下, 对流与水动力弥散引起的溶质混合效应相当, 随着 $\theta_{1,4}$ 的增大, 分支 1 的溶质扩散到分支 3 的概率增大, 交叉处相应能量损失的减小增强了机械弥散的作用, 因此宏观上体现为交叉处混合效应的增强, 从而引起了 M_r 的显著变化。

高 Pe 条件下, M_r 也随 $\theta_{1,4}$ 的增大而增大, 这也是由于这种几何效应的影响导致, 但此时流速很大, 机械扩散的增强效应有限, 故在宏观上表现出 M_r 的缓慢增大。当 $\theta_{1,4}$ 接近 180° 时, 交叉裂隙近似重叠为单裂隙, 由式(5)知 M_r 约为 0.5, 故在 $\theta_{1,4} = 175^\circ$ 时发现 M_r 增长速率有明显增大的现象。

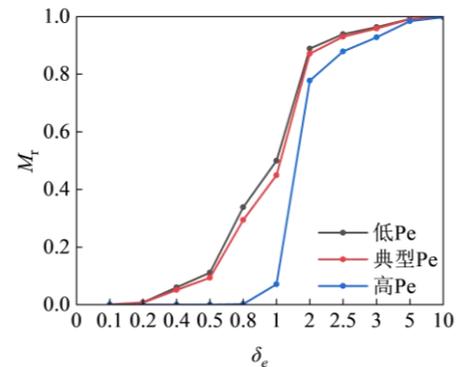
2.4 开度比的影响

开度比 δ_e ($\delta_e = e_1 / e_2$) 对交叉裂隙交叉处溶质运移的影响如图 12。不同 Pe 数下, 分支 3 处峰值浓度与 M_r 整体上表现为随 δ_e 增大而增大。



(a) 分支 3 出口浓度与开度比 δ_e 关系

(a) Relationship between outlet 3 concentration and δ_e



(b) 混合比 M_r 与开度比 δ_e 关系

(b) Relationship between M_r and δ_e

图 12 开度比 δ_e 对交叉裂隙溶质运移的影响

Fig. 12 Influence of δ_e on solute transport in intersecting fractures

低 Pe 数下, 对流影响可忽略, 由分子扩散主导的溶质运移更容易在交叉处扩散到开度大的分支, 因此

整体上表现出随着 δ_e 增大，出口 3 处峰值浓度和 M_r 均逐渐增大的现象。

随着 Pe 数增大，对流对交叉处溶质的混合产生影响。分支入口处注入的流体在交叉处汇聚后产生能量损失，加剧了溶质在交叉处的机械弥散过程。图 13 为典型 Pe 数下分支 3 和 4 出口处流量与 δ_e 的关系图，可以看出，典型 Pe 数下，对流与弥散对溶质运移的影响程度相当，溶质随流体产生沿流线的较为集中的运移，机械弥散也在这一过程中加强了交叉处的混合过程，部分溶质弥散到分支 2 处，再随着分支 2 中流体流向出口分支，因此产生图 12(a) 所示的出口 3 处峰值浓度整体变化不大的现象，且随着 δ_e 增大， M_r 的值也逐渐增大。图 14 为不同 Pe 数下，裂隙交叉处的浓度云图，可以看出，Pe 数越大这种由对流引起的集中的优势流效应越显著，因此高 Pe 数下溶质随流体运移更加集中，导致分支 3 出口处的峰值浓度以及 M_r 均随 δ_e 增大而逐渐增大。

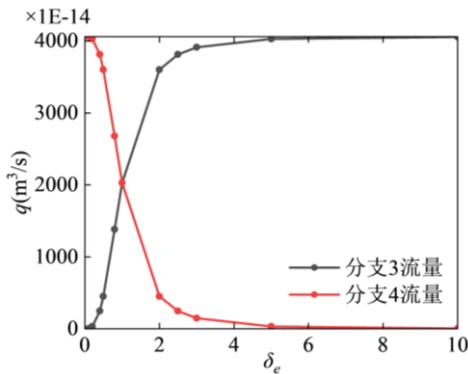


图 13 典型 Pe 数下各出口分支流量与开度比关系

Fig. 13 The relationship between flow and aperture ratio of each

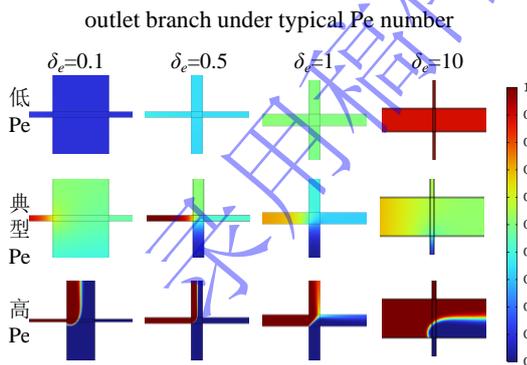


图 14 交叉处浓度分布图

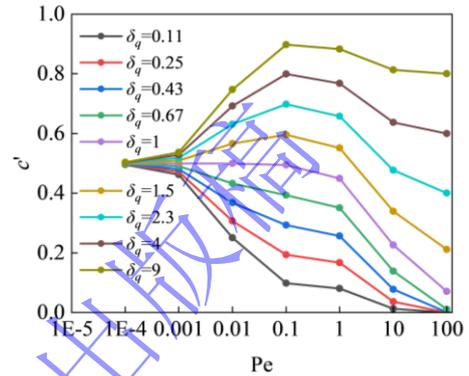
Fig. 14 Concentration distribution at intersections

3 讨论

上述研究均考虑入口流量相同的情况，研究发现，当裂隙开度比不同时，分支 3 和分支 4 出口处的流量有差别，考虑实际情况下裂隙的贯通，这将导致在下一个裂隙交叉处，存在不同分支注入交叉处的流量不

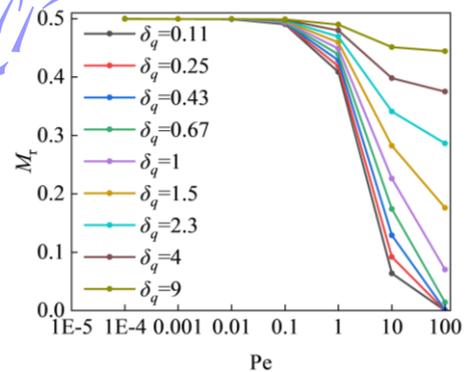
同的情况。因此，考虑不同流量比对交叉处溶质运移的影响，有助于更深入理解对流和水动力弥散这两种机制在溶质运移过程中起到的作用。

本节主要探讨流量不同时 ($\delta_q = q_1 / q_2$) 交叉裂隙的溶质运移特征，工况参数设置为 $\theta_{1,4} = 90^\circ$ ， $e_1 = e_2 = 0.1\text{mm}$ ，光滑交叉裂隙。考虑 Pe 数相同， δ_q 不同，以及 δ_q 相同，Pe 数不同两种情况，对溶质运移特征进行分析，结果如图 15 所示。



(a) 分支 3 出口浓度与 Pe 数关系

(a) Relationship between outlet 3 concentration and Pe



(b) 混合比 M_r 与 Pe 数关系

(b) Relationship between Mixing ratio M_r and Pe

图 15 不同流量比 δ_q 对交叉裂隙溶质运移的影响

Fig. 15 The Influence of different flow ratios δ_q on solute transport in intersecting fractures

当流量比 $\delta_q < 1$ 时，随着 Pe 数增加，分支 3 出口处峰值浓度呈现逐渐减小的趋势； $\delta_q \geq 1$ 时，分支 3 出口处峰值浓度随着 Pe 数增加表现为先增大后减小的趋势，拐点在 $Pe=0.1$ 处；相同 Pe 数下， δ_q 越小，分支 3 出口处峰值浓度也越小（图 15a）。同时，相同 Pe 数下， M_r 随着 δ_q 的增大而增大；相同 δ_q 下， M_r 随着 Pe 数增大表现出逐渐减小的趋势，这与 2.1 节结论一致。

$\delta_q < 1$ 时， $q_1 < q_2$ ，出口处 $q_3 = q_4$ ，这表明入口分支中流量大的流体在整体流动过程中占据主导地位。 δ_q 越小， q_1 越小， q_2 越大，分支 2 中流体在整个裂隙内的流动中占据主导地位，分支 2 的流体流向分支 3

和分支 4, 分支 1 的流体多流向分支 4, 这种流动结果削弱了交叉处的溶质分子水动力弥散过程, 导致随着 Pe 数增加, δ_q 越小, 出口 3 处峰值浓度越小(图 15(a))。

$\delta_q \geq 1$ 时, $q_1 \geq q_2$, 出口处 $q_3 = q_4$, 分支 1 中流体在流动中占据主导地位。 δ_q 越大, q_1 越大, q_2 越小, 经分支 1 流入交叉处的溶质越多, 相同混合效应的情况下经交叉处扩散到分支 3 的溶质也越多, 这导致在 Pe 数($Pe < 0.1$)较小时, 出口 3 溶质浓度出现随 δ_q 增大而增大的结果。随着 Pe 数继续增大($Pe \geq 0.1$), 交叉处的混合中, 对流引起的效应占据主导地位, 水动力弥散效应逐渐削弱, 出口 3 处峰值浓度开始随 Pe 数增大而减少。图 15(b)的结果也表明, 在 $Pe = 0.1$ 时出现的, 不同 δ_q 下分支 3 出口处峰值浓度的转变, 是对流效应与水动力弥散效应的作用地位开始发生转变的结果。

4 结论

本文综合考虑交叉裂隙不同几何特征, 开展了入口流量相同情况下裂隙内渗流与溶质运移模拟, 研究了交叉处几何特征、对流、水动力弥散对溶质运移的影响, 并对不同流量比下交叉处溶质的混合进行了讨论, 分析了其作用机理, 主要结论如下:

(1) $Pe < 0.01$ 时, 溶质运移由分子扩散主导; $0.01 \leq Pe < 0.5$ 时, 机械弥散对交叉处的混合有一定增强作用; $0.5 \leq Pe < 500$ 时, 对流与水动力弥散对溶质运移的影响相当且处于同一数量级下, 且弥散效应中逐渐由分子扩散主导转向机械弥散主导; $Pe \geq 500$ 时, 对流主导交叉裂隙的溶质运移过程, 机械弥散对交叉处的混合增幅有限, 分子扩散的影响可忽略不计。实际工程中, 忽略机械弥散将导致对交叉处混合程度的低估。

(2) 交叉裂隙内流体的流动形式, 以及粗糙裂隙中裂隙凹凸段导致的局部流动加速, 使得溶质到达出口处的时间呈早到和拖尾现象, 但这种二维情况下的裂隙粗糙度效应对溶质在交叉处的混合程度影响较小。

(3) 交叉裂隙的交叉角, 通过影响溶质在交叉处弥散到不同分支的概率, 以及影响不同分支注入的流体在交叉处汇聚所造成的对机械弥散效应的增强程度, 影响交叉处的混合。

(4) 交叉裂隙不同分支的开度比, 一方面改变了交叉处溶质分子弥散到不同出口分支的概率, 另一方面影响了相应优势流的流动通道, 进而对交叉处的混合产生影响。

(5) 入口分支不同流量比的注入, 影响了优势流的产生位置, 导致溶质运移过程中对流效应的改变, 进而影响了交叉处混合程度的变化。

参考文献

- [1] 周志芳, 王锦国. 裂隙介质水动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.(ZHOU Zhi-fang, WANG Jin-guo. Theory on dynamics of fluids in fractured medium[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2004. (in Chinese))
- [2] 周新, 盛建龙, 叶祖洋, 罗旺, 黄诗冰, 程爱平. 岩体粗糙裂隙几何特征对其 Forchheimer 型渗流特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(11): 2075-2083. (ZHOU Xin, SHENG Jianlong, YE Zuyang, LUO Wang, HUANG Shibing, CHENG Aiping. Effects of geometrical feature on Forchheimer-flow behavior through rough-walled rock fractures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(11): 2075-2083. (in Chinese))
- [3] 李博, 黄嘉伦, 钟振, 邹良超. 三维交叉裂隙渗流传质特性数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(09): 3670-3678.(LI Bo, HUANG Jialun, ZHONG Zhen, ZOU Liangchao. Numerical simulation on hydraulic and solute transport properties of 3D crossed fractures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(09): 3670-3678. (in Chinese))
- [4] Li B, Mo Y Y, Zou L C, Liu R C, Cvetkovic V. Influence of surface roughness on fluid flow and solute transport through 3D crossed rock fractures[J]. Journal of Hydrology, 2020, 582: 1-17.
- [5] Bodin J, Delay F, deMarsily G. Solute transport in a single fracture with negligible matrix permeability: 1. Fundamental mechanisms[J]. Hydrogeol. Journal, 2003, 11(4): 418-433.
- [6] Li G M. Tracer mixing at fracture intersections[J]. Environmental Geology, 2002, 42(2-3): 137-144.
- [7] Zou L C, Jing L R, Cvetkovic V. Modeling of flow and mixing in 3D rough-walled rock fracture intersections[J]. Advances in Water Resources, 2017, 107: 1-9.
- [8] Wilson C R, Witherspoon P A. Flow interference effects at fracture intersections[J]. Water Resources Research, 1976, 12(1): 102-104.
- [9] Hull L C, Koslow K N. Streamline Routing Through Fracture Junctions[J]. Water Resources Research, 1986, 22(12): 1731-1734.
- [10] Hull L C, Miller J D, Clemo T M. Laboratory and Simulation Studies of Solute Transport in Fracture Networks[J]. Water Resources Research, 1987, 23(8): 1505-1513.
- [11] Johnson J, Brown S. Experimental mixing variability in intersecting natural fractures[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(22): 4303-4306.
- [12] Philip J R. The Fluid Mechanics of Fracture and Other

- Junctions[J]. *Water Resources Research*, 1988, 24(2): 239-246.
- [13] Berkowitz B. Mass transfer at fracture intersections: An evaluation of mixing models[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(6): 1765-1773.
- [14] Robinson J W, Gale J E. A laboratory and numerical investigation of solute transport in discontinuous fracture systems[J]. *Ground Water*, 1990, 28 (1): 25-36.
- [15] Stockman H W. Mixing at fracture intersections: influence of channel geometry and the Reynolds and Peclet numbers[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(22): 4299-4302.
- [16] Park Y J, Lee K K. Analytical solutions for solute transfer characteristics at continuous fracture junctions[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(5): 1531-1538.
- [17] National Academies of Sciences, Engineering, Medicine. *Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications*[M]. Washington DC: The National Academies Press, 1996, 30-93.
- [18] Johnson J, Brown S, Stockman H. Fluid flow and mixing in rough walled fracture intersections[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(B12): 1-16.
- [19] 李崑, 王者超, 毕丽平, 刘杰. 辐射流条件下裂隙岩体渗透性表征单元体尺寸与等效渗透系数[J]. *岩土力学*, 2019, 40(02): 720-727.(LI Wei, WANG Zhechao, BI Liping, LIU Jie. Representative elementary volume size for permeable property and equivalent permeability of fractured rock mass in radial flow configuration[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(02): 720-727. (in Chinese)).
- [20] Jie Liu J, Wang Z C, Qiao L P, Guo J F, Li W. Nonlinear Flow Model for Rock Fracture Intersections: The Roles of the Intersecting Angle, Aperture and Fracture Roughness[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55: 2385-2405.
- [21] 李传亮. *油藏工程原理*[M]. 北京: 石油工业出版社, 2020.(Li Chuan-liang. *Fundamentals of Reservoir Engineering*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020. (in Chinese))
- [22] Peacock D C P, Sanderson D J, Rotevatn A. Relationships between fractures[J]. *Journal of Structural Geology*, 2018, 106: 41-53.
- [23] Dijk P, Berkowitz B. Precipitation and dissolution of reactive solutes in fractures[J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(3): 457-470.
- [24] 王志良, 申林方, 徐则民, 李邵军. 岩体裂隙面粗糙度对其渗流特性的影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(7): 1262-1268. (WANG Zhiliang, SHEN Linfang, XU Zemin, LI Shaojun. Influence of roughness of rock fracture on seepage characteristics[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(7): 1262-1268. (in Chinese))