

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.014

边界层对粗糙单裂隙溶质运移影响试验

田峥颖,陈舟,马兴,杜昭颖,金敏

(河海大学地球科学与工程学院,江苏南京 211100)

摘要:为探究非费克(non-Fickian)运移表现出的峰值提前到达和拖尾等现象,开展了粗糙单裂隙溶质运移试验,总结了粗糙单裂隙中溶质运移特征及运移机理,结合边界层理论对峰值提前到达和拖尾现象进行了分析和解释。结果表明:峰值时间和拖尾时间与边界层厚度之间存在较好的线性相关关系;边界层对裂隙介质溶质运移有较为显著影响,即水流速度越小,边界层厚度越大,滞留在边界层内部的溶质越多,溶质获取率越低;粗糙单裂隙中溶质穿透曲线的峰值提前和拖尾现象是由裂隙中心处以惯性力主导的主流区和裂隙壁面以黏性力主导的边界层区共同作用造成的,其中峰值时间主要由主流区的对流因素控制,而边界层区域的存在对拖尾时间影响较大。

关键词:溶质运移;非费克运移;峰值时间;拖尾时间;边界层理论;粗糙单裂隙

中图分类号:P641 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2023)02-0106-08

Experimental study of the effect of boundary layer on the solute transport in a rough single fracture

TIAN Zhengying, CHEN Zhou, MA Xing, DU Zhaoying, JIN Min

(School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: To explore the phenomena of early peak arrival and trailing of non-Fickian migration, the solute migration experiment of a rough single fracture is carried out, the solute migration characteristics and migration mechanism in the rough single fracture are summarized, and the phenomena of early peak arrival and trailing are analyzed and explained in combination with the boundary layer theory. The results show that there is a good linear correlation between the peak arrival time, the trailing time and the thickness of the boundary layer; The boundary layer has a significant effect on the solute transport in fractured media, that is, the smaller the flow velocity is, the greater the thickness of the boundary layer is, the more solutes remain in the boundary layer, and the lower the solute acquisition rate is; the peak advance and trailing of solute penetration curve in the rough single fracture are caused by the joint action of the main flow area dominated by the inertial force in the fracture center and the boundary layer area dominated by the viscous force on the fracture wall. Among them, the peak arrival time is mainly controlled by the convection factor in the main flow area and the existence of the boundary layer area has a great influence on the trailing time.

Key words: solute transport; non-Fickian transport; peak arrival time; trailing time; boundary layer theory; rough single fracture

随着地下水污染防治、放射性核废料及碳的深层地质处置、石油及天然气的开采等方面的持续推进,裂隙介质地下水污染物迁移机理及模型方面的研究成为环保领域的研究热点^[1-3]。由于裂隙介质强烈的空间变异性,其地下水流动及溶质运移十分复杂,用于量化裂隙介质渗流和污染物迁移的基本理论尚存在问题^[4-7]。大量的试验和数值模拟研究发现,裂隙介质中溶质运移呈现出具有尺度效应的弥散现象^[8-11],也称非费克(non-Fickian)运移,具体表现为溶质穿透曲线(breakthrough curve, BTC)具有峰值提前到达、多峰和拖尾等特征。不少学者围绕 non-Fickian 运移进行了研究^[12-21],其中,Zheng 等^[15-17]研究发现高渗透性、连通性良好的优先水流通道导致了峰值提前;Tsang^[18]认为粗糙度的存在,在裂隙中间形成以惯性力主导的主流区,导致了峰值的提前出现,而拖尾现象是由裂隙基质对溶质的吸附、解吸等作用造成;Berkowitz 等^[19]通过

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1804302);中央高校基本科研业务费专项(B220202053);国家自然科学基金重点项目(41831289)
作者简介: 田峥颖(1998—),女,硕士研究生,主要从事地下水渗流及数值模拟研究。E-mail:tzzyyds@hhu.edu.cn
通信作者: 陈舟(1983—),男,副教授,博士,主要从事地下水渗流及污染控制研究。E-mail:chenzhoucly@hhu.edu.cn
引用本文: 田峥颖,陈舟,马兴,等.边界层对粗糙单裂隙溶质运移影响试验[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):106-113.
TIAN Zhengying, CHEN Zhou, MA Xing, et al. Experimental study of the effect of boundary layer on the solute transport in a rough single fracture[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(2): 106-113.

核磁共振技术发现粗糙裂隙渗流场紧贴壁面处存在水流滞流区,但这种观点被 Becker 等^[20]质疑,他们认为裂隙宽的空间随机性导致了拖尾现象;Edson 等^[21]也认为拖尾现象是由高度异质的空间孔径分布造成的。裂隙溶质运移中的峰值提前和拖尾现象的机理方面仍需要进一步开展研究。

1904 年,Prandtl 通过大量试验发现了物面近区黏性力起重要作用的边界层 (boundary layer),并创立了边界层理论^[22]。此后,不少学者围绕边界层理论展开研究^[23-24],其中,Koch 等^[25-26]在孔隙介质中开展了溶质运移试验,考虑了固体颗粒表面的边界层条件,其物理意义与裂隙表面可能存在的边界层条件一致;Munson 等^[27]也认为拖尾现象可能与裂隙介质中存在停滞边界层有关。Qian 等^[28]通过试验研究发现垂直平板裂隙中的非费克现象与裂隙壁面的边界层有关。针对粗糙单裂隙介质中边界层对溶质运移的影响尚需开展进一步研究。

本文以粗糙单裂隙中溶质运移试验为基础,分析粗糙单裂隙中溶质运移特征并揭示其运移机理,尝试并运用边界层理论解释 non-Fickian 运移中出现的峰值提前到达和拖尾等现象,为完善粗糙单裂隙溶质运移理论和地下水污染防治提供理论支撑。

1 单裂隙溶质运移试验

1.1 试验装置

试验装置主要分为裂隙主体、进水装置、出水装置和测量装置 4 个部分,如图 1(a)所示,各部分统一使用内径为 9 mm 的硅胶管连接。因为天然裂隙岩体比高仿真人工裂隙能够更加真实地反映裂隙介质中溶质运移特征,因此单裂隙选用尺寸 28 cm×21 cm×4 cm 的板岩裂隙薄板。为了得到精确的隙宽数据,使用型号为 ZScanner 700 的三维激光扫描仪 (测量精度为 0.1 μm,采样速度为 18 000 次/s)、两台摄像机对裂隙主体进行扫描,结果如图 1(b)所示。根据统计数据,裂隙隙宽平均值为 215.8 μm,最大值为 974.5 μm,最小值为 1.1 μm。

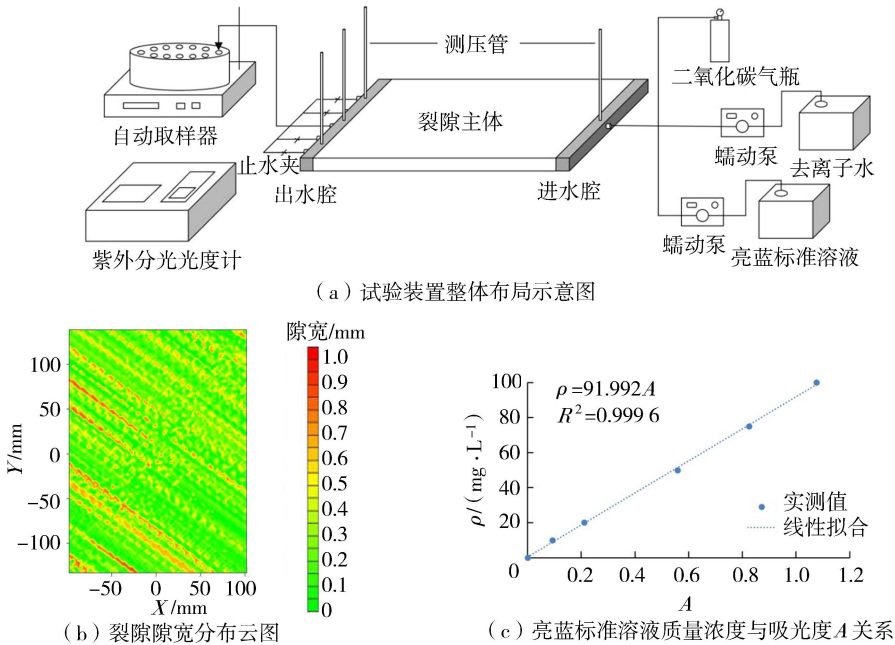


图 1 试验装置布局及试验装置参数特征

Fig. 1 Layout and parameter characteristics of the experimental device

进水装置包括去离子水、二氧化碳气瓶、蠕动泵和有机玻璃进水腔。去离子水通过二次蒸馏而得,电导率为 0.1 μs/cm,满足试验要求。二氧化碳气体可替换裂隙中的空气,减小由于气泡产生水流阻滞的影响,但试验时需要及时排出。蠕动泵型号为杰恒 BT-300EA153Y,泵转速可调节范围为 0.1 ~ 300 r/min,对应的流量为 0.45 ~ 1 368 mL/min。进水装置通过 2 个三通转换接头控制流入裂隙体内的物质成分,硅胶管的一端连接有机玻璃进水腔,另外一端分别连接二氧化碳气瓶、去离子水以及亮蓝标准溶液。

测量装置主要是紫外分光光度计,型号为 HACH-DR5000。示踪剂采用食品级染色剂亮蓝^[29],试验过程中采集到的溶液及时密封存放在无光照的地方,并及时检测其浓度。溶液使用美国进口原装哈希消解管进

行接样,消解管统一使用去离子水进行冲洗,并利用恒温干燥箱进行干燥处理。亮蓝标准溶液使用容量瓶进行配置,质量浓度分别为 10 mg/L、20 mg/L、50 mg/L、75 mg/L、100 mg/L。电子天平型号为上海菁海 FA1004N,量程为 0.1 ~ 100 mg。亮蓝的吸光峰值为 289 nm,经检测,亮蓝溶液浓度与吸光度 A 的关系如图 1(c) 所示,试验采用浓度为 100 mg/L 的亮蓝标准溶液。

1.2 试验方案

由于试验过程中出水口处的水头始终保持不变,需通过改变进水口处的水头改变水力坡度的大小,从而改变渗流速度,并监测不同流速下的渗流量,绘制出相应的 BTC 曲线,通过提取、计算峰值时间、拖尾时间、峰值大小、弥散系数、边界层厚度等特征参数,分析单裂隙溶质运移特征以及边界层对溶质运移的影响。

由于裂隙内部隙宽不均一,粗糙度各向异性,造成裂隙各处溶质运移不均一,为深入研究裂隙内部各处溶质运移特征,设计了单出口溶质运移试验。为对比不同示踪剂注入方式下溶质运移特征及边界层对溶质运移的影响,设计了连续示踪试验和瞬时示踪试验。具体方案如下:①单出口连续示踪试验。持续线性注入初始浓度为 100 mg/L 的亮蓝标准溶液直至渗出液浓度达到峰值,然后通入去离子水直至渗出液浓度降至零,渗出液出水口设为一个;②单出口瞬时示踪试验。瞬时通入一定体积的初始浓度为 100 mg/L 的亮蓝标准溶液后持续通入去离子水直至渗出液浓度降至零,渗出液出水口设为一个。

在进行溶质运移试验之前,首先开展了渗流试验,由渗流试验的结果可知,当地下水流速较小(雷诺系数 $Re \leq 10$)时,裂隙内渗流为线性流,水流速度与水力坡度之间为线性关系,当地下水流速较大($Re > 10$)时,裂隙渗流开始出现非线性流,此时达西定律不再适用。

2 结果与分析

2.1 边界层与溶质运移关系分析

通过大量的连续示踪试验,获取不同水力坡度下 BTC 曲线(图 2,图中 J 为水力坡度, ρ 为试验测出液质量浓度, ρ_0 为示踪剂初始质量浓度),分析溶质运移特征。由图 2 可知,单裂隙溶质运移存在以下几点特征:①溶质穿透曲线呈现出非正态分布现象;②溶质穿透曲线呈现出明显的峰值提前、拖尾现象。

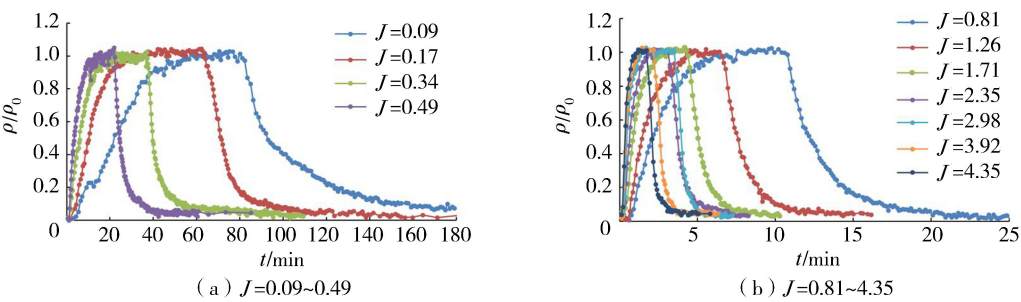


图2 连续示踪试验 BTC 曲线

Fig.2 BTC curve of the continuous tracing experiment

在裂隙流中,贴近裂隙壁面存在一层边界层。在边界层中,黏性力占主导,不容忽视。在边界层外部,惯性力占主导作用,黏性力可以忽略不计。边界层与裂隙隙宽相比,厚度十分小。Koch 等^[26]认为边界层在对流现象中的作用不容忽视,并给出了边界层厚度 δ 的计算公式:

$$\delta = \frac{b}{\sqrt[3]{P_e}}$$

(1)

其中

$$P_e \approx bu/D_{diff}$$

式中: b 为裂隙隙宽,mm; P_e 为 Peclet 数; u 为水流速度,mm/s; D_{diff} 为分子扩散系数,mm²/s,由于试验条件有限,取经验值 0.002 8 mm²/s。

b 采用等效水力隙宽 b_h ^[30-31] 表示:

$$b_h = \sqrt[3]{\frac{12q\nu}{gJ}}$$

(2)

式中: q 为单宽流量,(m³ · s⁻¹)/m; ν 为水流的运动黏滞系数,m²/s; g 为重力加速度,取 9.794 9 m/s²。

当使用水流速度较小时的 q 与 J 进行计算时, b_h 为 $187.6\text{ }\mu\text{m}$, 与三维激光扫描所得的裂隙隙宽平均值 $215.8\text{ }\mu\text{m}$ 在量级上保持一致。

裂隙介质溶质运移中, 可将裂隙内部流体流动分为由惯性力主导的主流区和由黏性力主导的边界层区。引入边界层相对厚度 ($\delta' = 2\delta/b_h$) 和主流区相对厚度 ($\delta'_1 = 1 - 2\delta/b_h$) 的概念, δ' 与 b 大小无关, 它反映了该处裂隙 δ 与 b 的相对大小, δ' 越大, 表明该裂隙处 δ'_1 越小, 滞留区厚度越大。经计算, 不同流速下的 P_e 、 δ' 、 δ'_1 、峰值时间及拖尾时间见表 1 (渗出液最初到达峰值的时刻为峰值时间 $t_{\text{峰}}$, 以渗出液浓度低于示踪剂初始浓度 5% 为拖尾时间 $t_{\text{尾}}$)。

由图 3 可知, 峰值时间、拖尾时间与 δ' 、 δ'_1 间存在较好的线性相关关系, 即峰值时间与拖尾时间随 δ' 增加而增大, 随 δ'_1 增大而减小; 峰值时间和拖尾时间与 J 均呈负幂指数相关。

表 1 不同流速下的 P_e 数、 δ' 、 δ'_1 、峰值时间及拖尾时间

Table 1 P_e , δ' , δ'_1 , peak time and trailing time at different flow rates					
$u/(mm \cdot s^{-1})$	P_e	δ'	δ'_1	$t_{\text{峰}}/\text{min}$	$t_{\text{尾}}/\text{min}$
2.2	149	0.004 47	0.995 53	57.42	150.00
4.2	284	0.002 35	0.997 65	34.03	63.68
8.1	545	0.001 22	0.998 78	22.43	39.58
12.2	815	0.000 82	0.999 18	13.07	23.92
21.4	1 433	0.000 47	0.999 53	7.57	10.57
31.2	2 090	0.000 32	0.999 68	4.30	7.05
49.0	3 284	0.000 20	0.999 80	3.18	4.75
69.5	4 658	0.000 14	0.999 86	2.18	3.93
87.3	5 852	0.000 11	0.999 89	1.40	2.28
106.1	7 106	0.000 09	0.999 91	1.27	2.27
129.2	8 659	0.000 08	0.999 92	1.20	2.13

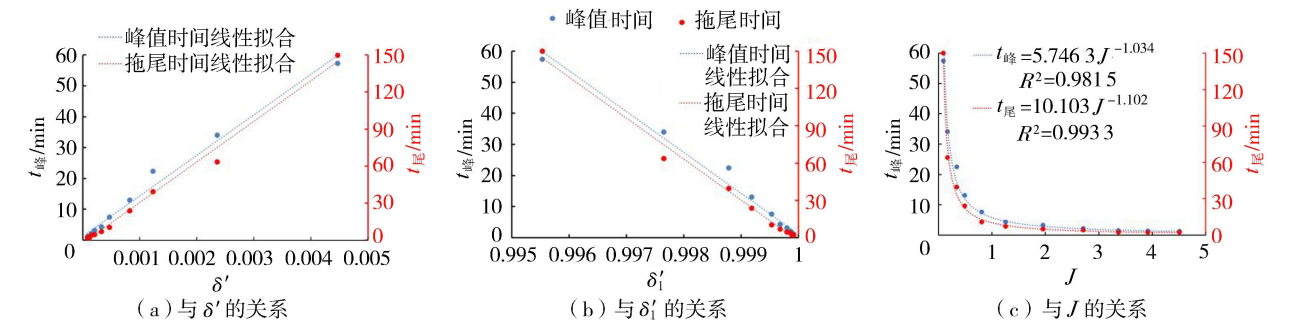


图 3 δ' 、 δ'_1 、 J 与峰值时间、拖尾时间的关系

Fig. 3 Relationship between δ' , δ'_1 , J and peak time and tail time

由此可知, 溶质运移过程中出现的峰值提前和拖尾现象是由裂隙中心以惯性力主导的主流区和裂隙壁面以黏性力主导的边界层区共同作用而成的。当裂隙隙宽一定, 增大水流速度时, 主流区厚度增大, 水动力弥散作用增强, 峰值时间缩短; 当裂隙隙宽一定, 减小渗流场流速时, 边界层厚度增大, 滞留区溶质运移速度较慢, 拖尾现象加重; 当渗流速度一定, 减小裂隙隙宽时, 边界层厚度增大, 拖尾时间延长。所以, 峰值时间主要由主流区的渗流情况决定, 而边界层区的流动主要对拖尾时间影响较大。

为了进一步验证边界层对溶质运移的影响, 定义 BTC 曲线与 x 轴形成的面积除以示踪剂初始浓度与 x 轴形成的面积作为溶质获取率 (R_{ec})。由图 4 可知, 获取率与 δ 之间存在较好的线性相关关系, 即水流速度越大, δ 越小, 溶质获取率越高。

由于裂隙壁面对溶质的黏性力作用产生的边界层区和由于粗糙度形成的尾流区内部的溶质运移速度相比惯性力主导的主流区小很多, 所以可以将边界层区和尾流区视为广义边界层区。广义边界层区内部的溶质迁移速率远小于主流区内溶质迁移速率, 导致注入的示踪剂终将有部分溶质很难迁移出来。

虽然边界层厚度与裂隙隙宽相比很小, 但由于广义边界层的存在, 关于粗糙裂隙介质溶质运移的分析变得更加复杂, 边界层对于溶质运移的影响更加不容忽视。理论上讲, 当边界层厚度为零时, 获取率应达到 1, 但是由于在计算获取率时, 以渗出液溶度与示踪剂初始溶度比值为 0.05 作为 BTC 曲线的终点, 产生了一定误差。当水流速度越小时,

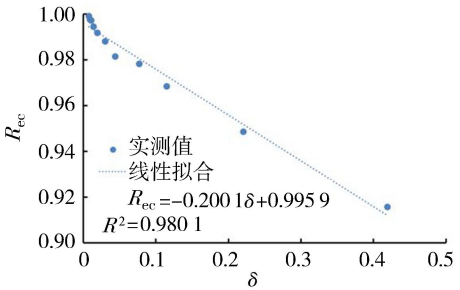


图 4 δ 与获取率的关系

Fig. 4 Relationship between δ and acquisition rate

δ 越大,广义边界层内部的溶质总量越多,迁移时间延长,导致溶质获取率越低。

2.2 广义边界层与溶质运移关系分析

瞬时示踪试验通过瞬时注入的方式,注入一定体积的示踪剂,观察定量示踪剂在裂隙介质中运移的情况。通过前期试验发现,瞬时示踪试验示踪剂的体积一般应达到裂隙体积的 20 ~ 30 倍,效果较好。 b_h 乘以裂隙的长度和宽度得到裂隙的体积为 10.5 cm³,故在本次试验中,示踪剂的体积定为 210 cm³。单出口瞬时示踪试验设 J 分别为 0.81、1.96、2.71、3.92、4.51,试验结果如图 5 所示。从 BTC 曲线形态上看,单裂隙溶质运移瞬时示踪试验有以下几点特征:①BTC 曲线呈现出非正态分布现象;②BTC 曲线呈现出明显的峰值提前现象,线性流条件下拖尾现象相对非线性流条件下较为严重;③BTC 曲线呈现单峰现象,不同水力坡度条件下峰值大小基本保持一致,水力坡度越大,渗流速度越快,峰值时间越短。

瞬时示踪试验 BTC 曲线峰值均未达到初始值大小(图 5),这是由于示踪剂投放后,高浓度的亮蓝溶液与低浓度的去离子水之间存在较大的浓度差,溶质在浓度差驱使下做分子扩散,促使示踪剂浓度降低。从 BTC 曲线形态上来看,峰值大小与水流速度之间并无直接关系,在不同水流速度下,峰值大小基本一致,但是水流速度影响峰值时间,水流速度越快,峰值时间越短,这是由于水流速度较大时,水动力弥散作用较强,溶质运移速率较快(表 2)。

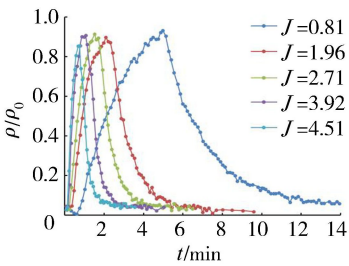


图 5 不同 J 条件下瞬时示踪试验 BTC 曲线
Fig. 5 BTC curve of instantaneous tracing test under different J conditions

表 2 不同水流速度下 δ 、 P_e 、峰值时间及拖尾时间
Table 2 δ , P_e , peak time and trailing time at different flow velocities

$u/(mm \cdot s^{-1})$	P_e	$\delta/\mu m$	$t_{峰}/min$	$t_{尾}/min$
21.4	1433	0.04363	4.98	14.70
49.0	3284	0.01904	2.08	5.68
69.5	4658	0.01343	1.52	4.60
106.1	7106	0.00880	1.07	3.10
129.2	8659	0.00722	0.75	2.83

由图 6(a)可知,峰值时间和拖尾时间与 J 之间仍然存在负幂指数相关关系。当 J 较小时,峰值时间较长,拖尾时间也较长。当水力坡度较大时,峰值时间较短,拖尾时间也较短。由表 2、图 6(b)可知,瞬时示踪试验中峰值时间、拖尾时间与 δ 之间存在较好的线性相关关系,即 δ 越大,峰值时间越长,拖尾时间越长。通过计算 P_e 可以看出,瞬时示踪试验与连续示踪试验的 P_e 保持一致,而且瞬时示踪试验的 P_e 均大于 10³,表明裂隙内部渗流场机械弥散作用强烈,而机械弥散作用受水流速度的影响,二者密不可分。

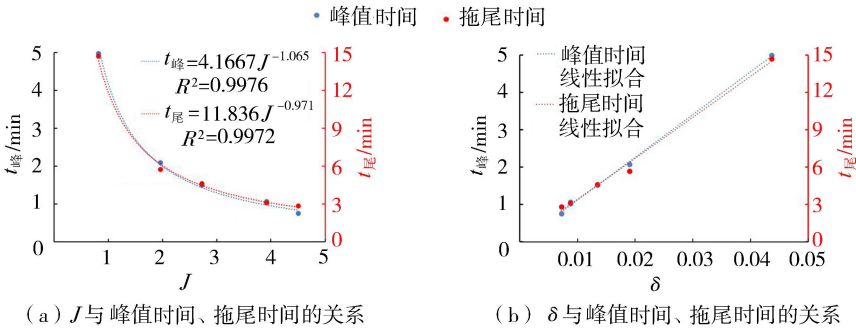


图 6 J 、 δ 与峰值时间、拖尾时间的关系

Fig. 6 Relationship between J , δ and peak time and trailing time

综上,瞬时示踪试验与连续示踪试验得出的结果一致,即峰值时间及拖尾时间与 J 之间均存在负幂指数相关关系,而峰值时间及拖尾时间与 δ 之间存在良好的线性相关关系,表明边界层厚度 δ 的大小对于溶质运移速率有较为显著的影响。

3 数值模拟方法对比分析

为了深入分析边界层对单裂隙介质溶质运移的影响,选用 COMSOL 软件对板岩裂隙中的溶质运移进行模拟研究。数学模型选用对流-弥散方程(ADE),模拟单裂隙在不考虑边界层对溶质运移影响情况下的运移特征,二维模型方程如下:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (u_x \rho) + \frac{\partial}{\partial y} (u_y \rho) \right]$$

(3)

式中: ρ 为溶质浓度; D_x 、 D_y 分别为水动力弥散系数 D 在 x 、 y 上的分量。

边界条件、初始条件分别为

$$\rho(x,y,0) = 0 \quad (x \geq 0, y \geq 0)$$

(4)

$$\rho(x,y,t) \Big|_{x=0} = \begin{cases} \rho_0 & 0 \leq t \leq t_0 \\ 0 & t_0 < t \leq +\infty \end{cases}$$

(5)

为了简化数值模型,可将物理模型概化为一个二维剖面上的单裂隙,裂隙长度为 28 cm,隙宽采用前期水流试验得出的等效水力隙宽 187.6 μm ,板岩岩体概化为长 28 cm、宽 4 cm 的剖面(图 7)。

本文不考虑溶质与岩体之间的吸附、解吸等作用,只考虑溶质在裂隙中的对流弥散作用,故将岩体部分概化为隔水边界,并仅对裂隙部分进行网格剖分,如图 7 所示。由于连续示踪试验示踪剂注入方式为线性注入,所以将裂隙最左侧设为溶质流入入口,并设为定水头边界,将裂隙最右侧设为溶质流出口,并设为定水头边界,水头大小采用物理试验实测数据。裂隙部分孔隙度设为 1,填充材料设为水,由于物理试验实测渗流场温度为 15℃,故水的运动黏滞系数采用 $1.139 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,流体密度设为 $999.1 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

针对溶质运移,COMSOL 软件提供了多种物理场,这里选用“稀物质传递”物理场,稀物质传递模块可以模拟对流弥散、吸附、分散、挥发等情况,这里只考虑对流弥散,溶质初始浓度设为 100 mg/L,模拟结果以相对浓度显示。

由图 8(a)可知,在只考虑对流-弥散作用时,单裂隙溶质运移 BTC 曲线特征为:①呈现明显的正态分布;②峰值为单峰;③没有出现峰值提前到达现象或拖尾现象。由图 8(b)(c)可知,峰值时间和拖尾时间随水力坡度的增大而减小。由于在模型概化时,忽略了裂隙粗糙度,而将裂隙概化为一个光滑平直的裂隙,并且不考虑裂隙壁面对溶质的吸附、解吸和黏性力作用,所以 ADE 拟合的结果是不考虑广义边界层时裂隙介质主流区内部溶质运移的情况,而实测数据是广义边界层存在时裂隙介质溶质运移的情况。

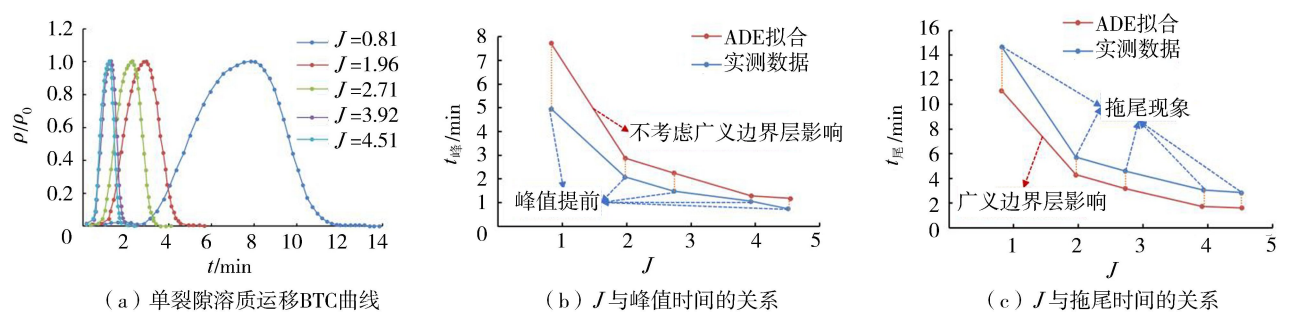


图 8 BTC 曲线及 J 与峰值时间、拖尾时间的关系

Fig. 8 BTC curve and the relationship between J and peak time and tail time

在相同水力坡度条件下,实测峰值时间相比 ADE 拟合时间明显较短,即表现出峰值提前到达现象,但是,试验实测拖尾时间相比 ADE 拟合拖尾时间明显较长,即表现出拖尾现象。所以,边界层的存在直接影响了粗糙单裂隙中溶质运移的情况,边界层厚度越大,BTC 曲线拖尾现象越严重。

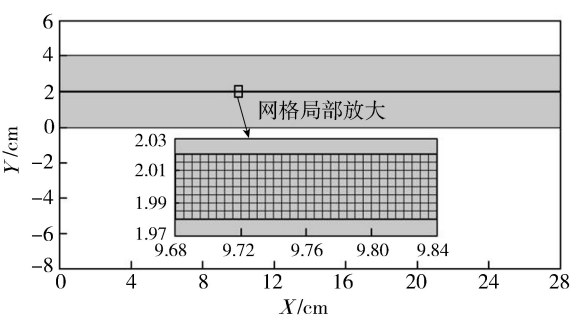


图 7 模型概化示意图

Fig. 7 Schematic diagram of model generalization

4 结 语

边界层对裂隙介质溶质运移有较为显著影响,即水流速度越小,边界层厚度越大,滞留在边界层内部的溶质越多,溶质获取率越低。裂隙溶质穿透曲线中的峰值提前和拖尾现象是由裂隙中心处以惯性力主导的主流区和裂隙壁面以黏性力主导的边界层区共同作用而成的,隙宽不变时,主流区厚度会随着流速增大而增大,水动力弥散作用增强,峰值时间缩短;而流速减小时,边界层厚度增大,滞留区溶质运移速度较慢,拖尾现象加重。

建议后续研究完善物理试验,深入揭示边界层对裂隙介质水流及溶质运移的影响,结合数学模型和数值模拟对裂隙介质溶质运移进行分析,揭示单裂隙介质溶质运移峰值提前、多峰、拖尾现象的原因。

参考文献:

[1] 吴建强,王敏,黄沈发,等. 平原河网区地下水污染风险评估体系及其应用[J]. 水资源保护,2019,35(4):55-62. (WU Jianqiang, WANG Min, HUANG Shenfa, et al. Risk assessment system of groundwater pollution in plain river network area and its application[J]. Water Resources Protection,2019,35(4):55-62. (in Chinese))

[2] 李阳坤,于福荣,孙剑,等. 灰渣填埋场地下水中典型污染物迁移数值模拟[J]. 人民长江,2020,51(11):46-52. (LI Yangkun, YU Furong, SUN Jian, et al. Numerical simulation of typical pollutant migration in groundwater of ash landfill[J]. Yangtze River,2020,51(11):46-52. (in Chinese))

[3] 李书迪,谢涪,张荣海,等. 西南某退役化工厂场地地下水污染特征及污染物迁移规律分析[J]. 环境工程技术学报,2022(5):1-15. (LI Shudi, XIE Tian, ZHANG Ronghai, et al. Analysis on groundwater pollution characteristics and pollutant migration law of a decommissioned chemical plant in Southwest China[J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2022(5):1-15. (in Chinese))

[4] 黄勇,周志芳. 多尺度裂隙介质中溶质运移研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(5):500-504. (HUANG Yong, ZHOU Zhifang. Advances in solute transport in multi-scale fractured media[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2005,33(5):500-504. (in Chinese))

[5] 沈回归,饶文波,谭红兵,等. 高寒区典型流域地下水化学特征、影响因素及健康风险[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):9-17. (SHEN Huigui, RAO Wenbo, TAN Hongbing, et al. Chemical characteristics, influencing factors and human health risks of groundwater in a typical alpine watershed[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(6):9-17. (in Chinese))

[6] 高小文,吕敬,李秀娟,等. 铜矿尾矿库污染物在地下水中运移规律数值模拟[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(2):120-125. (GAO Xiaowen, LYU Jing, LI Xiujuan, et al. Numerical simulation of pollutant transport law in groundwater of copper mine tailings pond[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2017,28(2):120-125. (in Chinese))

[7] 李旭,苏世林,文章,等. 变流速条件下非达西裂隙流溶质运移特征研究[J]. 安全与环境工程,2021,28(3):1-6. (LI Xu, SU Shilin, WEN Zhang, et al. Study on solute transport characteristics of non-Darcy fracture flow under variable velocity[J]. Safety and Environment Engineering,2021,28(3):1-6. (in Chinese))

[8] DOU Zhi, CHEN Zhou, ZHOU Zhifang, et al. Influence of eddies on conservative solute transport through a 2D single self-affine fracture[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2018,121:597-606.

[9] 李厚禹,徐艳,谭璐,等. 多介质土壤渗滤系统去除农村污水中典型污染物的研究进展[J]. 水资源保护,2022,38(4):156-165. (LI Houyu, XU Yan, TAN Lu, et al. Research progress on removal of typical pollutants from rural sewage by multi-soil-layering system[J]. Water Resources Protection,2022,38(4):156-165. (in Chinese))

[10] 郑志成,刘咏,王沐,等. 平行大理石板裂隙污染物运移试验与连续时间随机游走模拟[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2019,42(5):677-682. (ZHENG Zhicheng, LIU Yong, WANG Mu, et al. Pollutant transport experiment and continuous time random walk simulation of cracks in parallel marble slabs [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Sciences), 2019,42(5):677-682. (in Chinese))

[11] 高峰钧,马雷,马海春,等. 粗糙元对单裂隙中溶质运移影响模拟研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2021,36(4):516-522. (GAO Fengjun, MA Lei, MA Haichun, et al. Simulation study on the influence of rough element on solute transport in single fracture[J]. Hydrodynamics Research and Progress (Series A),2021,36(4):516-522. (in Chinese))

[12] ZHENGL Z, WANGL C, JAMESS C. When can the local advection-dispersion equation simulate non-Fickian transport through rough fractures? [J]. Stoch Environ Res Risk Assess,2019,33:931-938.

- [13] LI X C, ZHANG Y, DONALD M R, et al. Fractional-derivative models for non-Fickian transport in a single fracture and its extension[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125396.
- [14] SUN Zihao, WANG Liangqing, ZHOU Jiaqing, et al. A new method for determining the hydraulic aperture of rough rock fractures using the support vector regression[J]. *Engineering Geology*, 2020, 271(6): 105618.
- [15] ZHENG Chunmiao, BIANCHI M, GORELICK S M. Lessons learned from 25 years of research at the MADE site[J]. *Groundwater*, 2011, 49: 649-662.
- [16] BIANCHI M, ZHENG Chunmiao. A lithofacies approach for modeling non-Fickian solute transport in a heterogeneous alluvial aquifer[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52: 552-565.
- [17] 郭芷琳, 马瑞, 张勇, 等. 地下水污染物在高度非均质介质中的迁移过程: 机理与数值模拟综述[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(11): 1817-1836. (GUO Zhilin, MA Rui, ZHANG Yong, et al. Migration process of groundwater pollutants in highly heterogeneous media: review of mechanism and numerical simulation[J]. *Chinese Science: Earth Science*, 2021, 51(11): 1817-1836. (in Chinese))
- [18] TSANG Y W. Study of alternative tracer tests in characterizing transport in fractured rocks[J]. *Geophysical Research Letter*, 1995, 22(11): 1421-1424.
- [19] BERKOWITZ B, SCHER H. Anomalous transport in random fracture networks[J]. *Physical Review Letters*, 1997, 79(20): 4038-4041.
- [20] BECKER M W, SHAPIRO A M. Tracer transport in fractured crystalline rock: evidence of non-diffusive breakthrough tailing[J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(7): 1677-1686.
- [21] EDSON W, THOMAS H. Transport simulation with stochastic aperture for a single fracture comparison with a laboratory experiment[J]. *Water Resources*, 2002, 25: 19-32.
- [22] 章梓雄, 董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [23] SHAO M A. An approximate solution to the convection-dispersion equation of solute transport in soil[J]. *Soil Science*, 1998, 163(5): 339-345.
- [24] CHEN Zhou, QIAN Jiazhong, QIN Hua. Experimental study of the non-darcy flow and solute transport in a channeled single fracture[J]. *Hydrodyn*, 2011, 23: 745-751.
- [25] KOCH D L, BRADY J F. A non-local description of advection-diffusion with application to dispersion in porous media[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, 180: 387-403.
- [26] KOCH D L, BRADY J F. Nonlocal dispersion in porous media: nonmechanical effects[J]. *Chemical Engineering Science*, 1987, 42: 1377-1392.
- [27] MUNSON B R, YOUNG D F, OKIISHI T H. Fundamentals of fluid mechanics; 2nd ed[J]. *Biofluid Mechanics*, 2004, 31(3): 11-48.
- [28] QIAN Jiazhong, ZHAN Hongbin, CHEN Zhou, et al. Experimental study of solute transport under non-Darcian flow in a single fracture[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 399(3/4): 246-254.
- [29] 谈叶飞, 周志芳. 溶质运移试验中有色示踪剂高锰酸钾和亮蓝适用性的对比[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(1): 23-26. (TAN Yefei, ZHOU Zhifang. Comparison of applicability of colored tracers potassium permanganate and brilliant blue in solute transport test[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2008, 36(1): 23-26. (in Chinese))
- [30] 刘日成, 李博, 蒋宇静, 等. 等效水力隙宽和水力梯度对岩体裂隙网络非线性渗流特性的影响[J]. *岩土力学*, 2016, 37(11): 3165-3174. (LIU Richeng, LI Bo, JIANG Yujing, et al. Effect of equivalent hydraulic gap width and hydraulic gradient on nonlinear seepage characteristics of rock mass fracture network[J]. *Geotechnical Mechanics*, 2016, 37(11): 3165-3174. (in Chinese))
- [31] 王珂, 盛金昌, 郗会彩, 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 Jinchang, GAO Huicai, et al. Study on seepage characteristics of rough fractures under stress seepage erosion coupling[J]. *Geotechnical Mechanics*, 2020, 41(Sup1): 30-40. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-03-10 编辑: 刘晓艳)