薛 松,候梦瑶,杨志兵,等.包气带裂隙中滞留水对轻非水相液体迁移行为的影响 [J]. 中国环境科学, 2025,45(12):6641-6648.
Xue S, Hou M Y, Yang Z B, et al. Effects of entrapped water in fracture on LNAPL flow behavior in vadose zone [J]. China Environmental Science, 2025,45(12):6641-6648.

包气带裂隙中滞留水对轻非水相液体迁移行为的影响

薛 松[1],候梦瑶[1],杨志兵[2*],卢 斌[3],李 彪[1] (1.三峡大学水电工程施工与管理湖北省重点实验室,湖北 宜昌 443002；2.武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室,湖北 武汉 430072；3.南京水利科学研究院,江苏 南京 210029)

摘要：包气带裂隙中轻非水相液体(LNAPL)迁移及滞留是一个复杂的多相渗流过程,涉及到 LNAPL、水、气三相流体的相互作用.采用透明裂隙模型开展了干燥/存水状态下 LNAPL 迁移试验,并结合图像采集与处理技术获取了 LNAPL 动态迁移过程与滞留特征,揭示了裂隙存水对 LNAPL 迁移及滞留行为的影响.结果表明:LNAPL 在干燥裂隙(两相渗流)中表现为指进流形态,而在存水裂隙(三相渗流)中则以膜状流形态沿水滴边缘流动.与指进流相比,膜状流模式下 LNAPL 的流动通道更曲折、扩展范围更广,导致裂隙中的滞留量更大.膜状流影响的强弱依赖于裂隙存水量及其分布特征,与裂隙倾斜角度密切相关;当裂隙趋于水平时 LNAPL 迁移范围最广、滞留量最大,而趋于垂直时这种影响则最弱.此外,发现干燥/存水裂隙中 LNAPL 滞留区的裂隙隙宽均服从正态分布特征,但存水状态下 LNAPL 滞留的裂隙隙宽大于干燥状态,主要集中在 0.3~0.4mm.

关键词：裂隙介质；轻非水相液体；可视化试验；多相渗流；流动模式；滞留结构
中图分类号：X523 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)12-6641-08

Effects of entrapped water in fracture on LNAPL flow behavior in vadose zone. XUE Song[1], HOU Meng-yao[1], YANG Zhi-bing[2*], LU Bin[3], LI Biao[1] (1.Hubei Key Laboratory of Hydropower Engineering Construction and Management, China Three Gorges University, Yichang 443002, China；2.State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China；3.Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China). *China Environmental Science*, 2025,45(12)：6641~6648

Abstract：The migration and retention of light non-aqueous phase liquid (LNAPL) in fractured vadose zone is a complex multiphase seepage process, involving interactions among LNAPL, water, and air. To reveal the influence of entrapped water on LNAPL migration in fractures, comparative experiments on LNAPL migration in dry and water-entrapped fractures were conducted using a transparent fracture model. By combining image acquisition and processing techniques, the migration processes and retention characteristics of LNAPL in the experiments were obtained. The results showed that in dry fractures (under two-phase seepage conditions), LNAPL moved in the form of finger flow; however, in water-entrapped fractures (under three-phase seepage conditions), LNAPL moved in the form of film flow along the edges of water droplets. Compared with finger flow, the flow channel of film flow was more tortuous and the expansion range was wider, resulting in a larger retention volume of LNAPL in the fracture. The influence strength of film flow depended on the amount and distribution characteristics of water entrapped in the fracture, which were related to the fracture inclination angle. When the fracture tended to be horizontal, the migration range of LNAPL was the largest, and the residual amount was the greatest, whereas this effect was the weakest when the fracture tended to be vertical. Additionally, it was found that the fracture apertures of LNAPL residual zones in both dry and water-entrapped fractures followed a normal distribution. However, under water-entrapped conditions, the fracture aperture corresponding to the maximum LNAPL residual amount was larger than that under dry conditions, and it was mainly concentrated in the range of 0.3~0.4mm.

Key words：fractured media；light non-aqueous phase liquid；visualization test；multiphase flow；flow pattern；entrapment configuration

轻非水相液体(LNAPL)一般指密度比水小且不溶于水的有机化合物(如原油、汽油、柴油等),是地下水的主要污染源之一[1-2].当 LNAPL 泄露到地下后,其在重力的驱动下向下迁移,一部分在包气带形成稳定残留,另一部分则穿过包气带进入地下水系统[3-4].由于自然条件下降解缓慢,残留的 LNAPL 成为了岩土体—地下水污染的长期来源,因此研究包气带和含水层中 LNAPL 迁移及滞留成为地下水污

收稿日期：2025-05-19
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52209135,42177079);湖北省自然科学基金资助项目(2024AFB813)
* 责任作者, 教授, zbyang@whu.edu.cn

染风险评估的关键问题之一[5-8].

LNAPL 迁移过程中往往会沿渗透性更强的裂隙优先流动,对迁移范围具有重要影响[9-12].裂隙中 LNAPL 下渗锋面并非均匀推进,而是会在局部发展出“指状”的渗流结构,形成集中、快速的下渗[7,13];这种指状结构主要受到了重力、毛细力、粘滞力的联合控制,与裂隙面结构、壁面湿润性、液体的性质等因素密切相关[14].通过可视化实验,部分学者研究了不同流体在初始干燥裂隙中的迁移行为,发现非水相液体(NAPL)和水有相似的重力指进结构[15];指进迁移路径强烈依赖于润湿性,当液体为湿润相时其沿隙宽较大的裂隙通道流动,反之则沿隙宽较小通道流动[16].此外,重力指进迁移动态与倾斜角度高度相关,当裂隙由水平向垂直转变过程中,指进锋面推进速率越快,而指进宽度则逐渐减小[17].

NAPL 在裂隙或孔隙中迁移时会形成不同程度的滞留[18],这种滞留特征行为本质上受毛细阻滞力的控制.毛细力的大小与空隙大小密切相关,部分研究也发现 NAPL 的残留受到了裂隙隙宽分布的影响,残留区的隙宽符合正态分布规律[19-20];此外裂隙形貌(隙宽标准差、相关长度)变化会引起指进形态改变,同样也会影响 NAPL 滞留特性[21].NAPL 迁移和滞留是一个多相驱替过程,因此多相流体的相互作用也是影响其滞留的关键.可视化实验发现在孔隙介质中初始水饱和度变化会改变 NAPL 迁移结构,进而影响其滞留比例[22].

以往针对裂隙中 LNAPL 迁移与滞留行为的研究大多数聚焦于“LNAPL—气/水”两相体系,实际上包气带中裂隙不可避免会滞留下渗水流,形成“LNAPL—水—气”三相体系[23-24].在多相渗流过程中,一方面,滞留水会改变有效孔隙/裂隙空间,对多相驱替行为和溶质传输过程具有显著的影响[25-26];另一方面,复杂的相界面接触和驱替特性也会对流动行为产生影响.目前针对多相流体系下相界面接触和驱替特性如何影响 NAPL 迁移规律及机理的认识尚显不足[27].本研究旨在通过透明仿真裂隙可视化渗流试验,研究单裂隙中滞留水对 LNAPL 迁移及滞留行为的影响,阐明“LNAPL—水—气”三相体系下 LNAPL 迁移规律,揭示水的存在对 LNAPL 迁移行为的影响机制.

1 材料与方法

1.1 实验装置与裂隙模型

为直观观测裂隙中 LNAPL 迁移行为,构建了如图 1a 所示的渗流可视化试验装置.该装置以透明仿真裂隙模型为实验对象,采用光学透视平面成像方法进行观测.仿真裂隙模型固定在可以任意调节倾斜角度的载物台上;载物台下方设置有 LED 平板光源,为实验提供稳定背景光;裂隙模型正前方设置有光学相机可实时记录渗流过程.

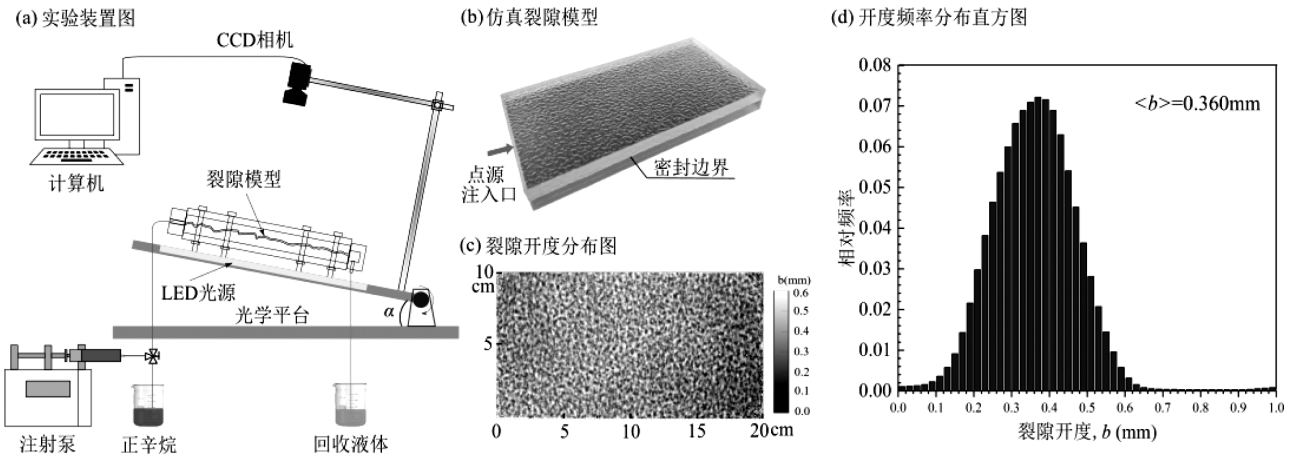


图 1 LNAPL 迁移可视化实验装置与裂隙模型

Fig.1 visualization experimental device and fracture model for LNAPL migration tests

仿真裂隙模型采用两块 20cm(长)×10cm(宽)毛玻璃拼合固定而成,裂隙长边为不透水边界,左侧短边中点设置小孔作为点源入渗边界,右侧短边通过管路与大气相通,为自由出流边界(图 1b).拼接固定

后裂隙开度场采用 Detwiler 等[28]提出的基于光透射法的裂隙宽度测量方法测量,测量的隙宽分布及其统计分析结果见图 1c 和图 1d.可以看出裂隙开度场服从正态分布,与以往真实岩石劈裂裂隙模型具有相似的分布规律[29].

1.2　实验步骤与数据获取

为研究裂隙水对 LNAPL 迁移的影响,对比开展了干燥、存水裂隙中 LNAPL 迁移实验.考虑到裂隙存水状态、流体迁移结构均与重力影响密切相关,进一步设置了 4 组不同裂隙倾斜角(α=10°,30°,60°,90°)工况,每组工况下开展了 2~5 组重复实验.具体实验步骤如下:

初始干燥裂隙中 LNAPL 迁移试验:①从倾斜裂隙顶部以恒定流量 Q=0.2mL/min 向裂隙中注入 LNAPL;②当 LNAPL 穿透裂隙时停止液体注入;③待裂隙中的 LNAPL 形成稳定滞留后结束实验.初始存水裂隙中 LNAPL 迁移试验:①从倾斜裂隙底部缓慢注入纯水直至裂隙完全饱和;②从底部自由排水直至裂隙中形成稳定的滞留水;③采用与初始干燥裂隙中 LNAPL 迁移实验相同的步骤开展后续试验.

试验选用工业汽油的主要成分烷烃(具体为正辛烷)为 LNAPL 代表性物质,其密度为 ρ_L=0.70g/cm^3,黏度 μ_L=0.546mPa·s,与空气间的表面张力 σ_{La}=0.022N/m;水密度为 ρ_w=1.0g/cm^3,黏度 μ_w=1.0mPa·s,与空气间的表面张力 σ_{wa}=0.072 N/m;水与正辛烷间的表面张力 σ_{wL}=0.051N/m.为定量化衡量裂隙模型表面湿润特性,通过拍摄实验用玻璃表面的微液滴形态,进一步测量了固—液—气/液三相界面接触角,其结果如图 2 所示.可以看出水(气)的静态接触角 θ_{wa}≈(60±2)°,正辛烷(气)接触角 θ_{La}≈(12±1)°,水(正辛烷)的接触角 θ_{wL}≈97°.

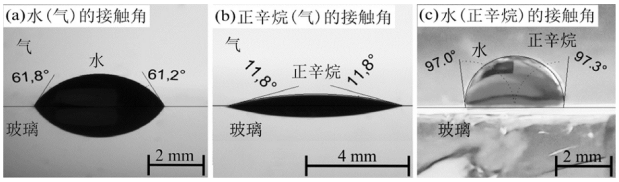


图 2　多相流体湿润特性

Fig.2　Multiphase fluid wetting characteristics

实验期间采用相机以 2 帧/s 的速率记录 LNAPL 侵入和滞留过程.每次试验过后采用无水乙醇冲洗模型裂隙面,并采用真空干燥箱真空干燥以备重复使用.为提高 LNAPL、水与空气的区分度,采用蓝色油性染料对正辛烷进行染色,浓度为 0.15%,采用辣椒红对水染色,浓度为 0.2%.后期采用数值图像处理的方法,提取每个时刻水、LNAPL、气在裂隙中的分布(图 3),其图像分辨率为 2360(长)×1180(宽).在 LNAPL 迁移范围量化方面,采用并统计了 LNAPL 横向(裂隙模型宽度方向)迁移影响宽度 $W(x)$,定义为在模型长边方向 x 断面内,两端 LNAPL 之间的距离,其中 0cm(模型入口)<x<20cm(模型出口).在 LNAPL 滞留特征量化方面,结合图 1(c)中裂隙开度分布,统计裂隙中滞留 LNAPL 体积占裂隙总体积比例(饱和度 S_L),统计了滞留 LNAPL 对应隙宽分布规律.

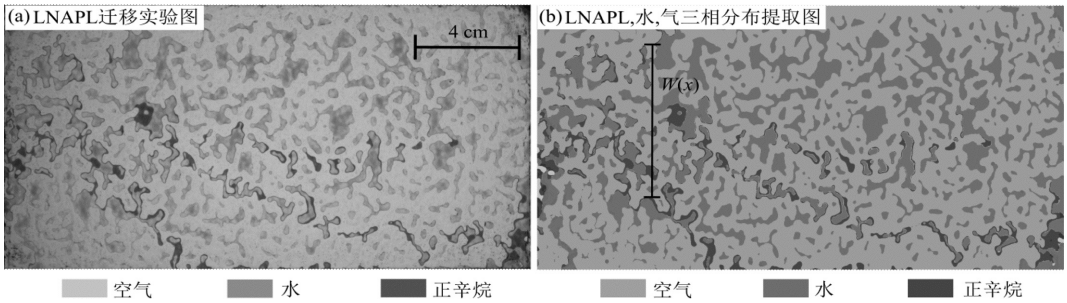


图 3　LNAPL 迁移过程数据获取

Fig.3　Data acquisition of LNAPL migration process

2　结果与分析

2.1　裂隙中 LNAPL 迁移特征行为

为揭示裂隙水对 LNAPL 迁移行为的影响,对比开展了干燥/存水裂隙(α = 90°)内 LNAPL 迁移试验.干燥裂隙内,LNAPL 以指进模式(优势流)下渗(图 4),其结构受到了重力和毛细力的联合控制.从整体上看,指进前进锋面受重力的驱动以裂隙倾斜方向为

主推进;从局部上看,受毛细力驱动的影响,锋面优先沿裂隙开度较小的通道推进,形成了曲折的流动通道和横向(指裂隙模型宽度方向)扩张的结构.随着指进不断扩展,液体所受重力不断增强,导致指进局部区域不可避免地发生排液行为;此时指进结构由连续状态向非连续(独立液滴)状态的转变(图 4c).后续 LNAPL 侵入时则以独立液滴为纽带,沿指进通道下渗.当停止注液后,重力继续驱动裂隙中 LNAPL 排出,而此时毛细力则转变为阻滞力维持液体滞留.LNAPL 滞留形态与其侵入时的指进结构高度相似.

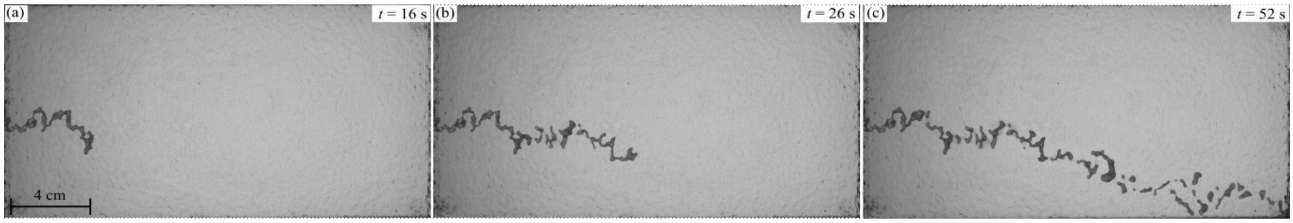


图 4 干燥裂隙 LNAPL 指进流动行为(α = 90°)

Fig.4 The fingering flow behavior of LNAPL in the initial dry fracture (α = 90°)

相较于干燥裂隙,存水裂隙中 LNAPL 迁移模式发生了显著转变,主要是以薄膜流的形态沿裂隙残留水滴的边缘流动(图 5).薄膜的扩展受到滞留水滴和裂隙开度共同影响,当 LNAPL 接触到水滴时会迅速以薄膜形式将其包裹,而当 LNAPL 需要跨越间断水滴时,往往在薄膜表面形成小型指进沿小开度通道推进.进一步对比了 LNAPL 侵入/穿透裂隙时刻残留水滴的分布特征,发现残留水滴始终保持稳定的形态(图 5a,c).这一现象表明膜状结构对残留水滴作用力有限,不足以驱动残留水滴运动,因此在非饱和裂隙中残留水滴也可视为 LNAPL 迁移的固定边界.当停止注液,膜状流动的 LNAPL 会迅速转变为稳定滞留状态.

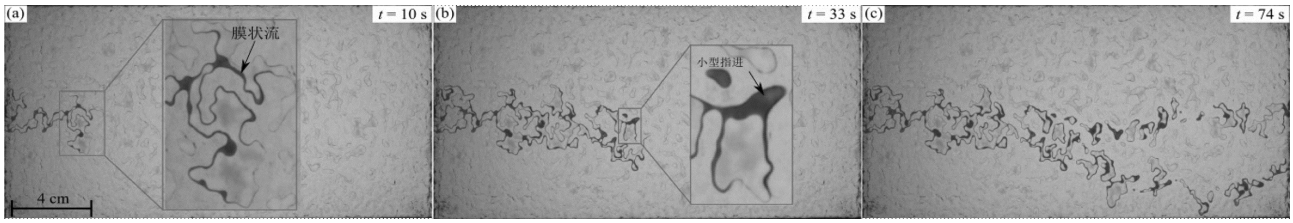


图 5 存水裂隙中 LNAPL 膜状流动行为(α = 90°)

Fig.5 The film flow behavior of LNAPL in the water−entrapped fracture (α = 90°)

2.2 裂隙倾角对 LNAPL 迁移行为的影响

干燥裂隙中指进结构和锋面速率受裂隙倾斜角度影响显著.当裂隙倾角 α=90°时,重力作用最强,LNAPL 主要沿重力梯度方向,以相对收敛的指进结构下渗,此时 LNAPL 穿透裂隙速率最快(图 6d).随着裂隙倾角减小,重力的影响逐渐减弱,在毛细力驱动下 LNAPL 逐渐倾向沿裂隙小开度通道优先流动,产生了更为弯曲流动通道和侧向扩展的结构; LNAPL 在裂隙中影响范围更大,相应地穿透裂隙速率较慢.从流动结构上看,裂隙倾角 α=90°, 60°,30°情形下 LNAPL 具有相同的优势流路径,此时重力在 LNAPL 流动中占优;而当裂隙趋近于水平时(如 α=10°情形),指进结构更为曲折,优势流动路径产生明显改变,此时毛细吸力占主导地位,指进结构更多受到裂隙开度分布的控制,横向扩展显著增强.

裂隙存水状态受毛细力和重力联合控制.当裂隙倾角较小时毛细力起主导作用,裂隙存水主要为大斑块液滴,该状态下水滴扮演着“桥梁”作用,为膜状流状态下 LNAPL 大范围的迁移及滞留提供了有利条件(图 7a).而随着倾角 α 增大重力影响增强,大开度的通道发生排水行为,大斑块水滴断裂转变为离散小液滴.一方面残留水滴变小导致“桥梁”作用减弱,削弱了膜状流横向迁移能力;另一方面水滴之间空间增多,增强了指进流效应,有利于 LNAPL 沿重力方向流动.

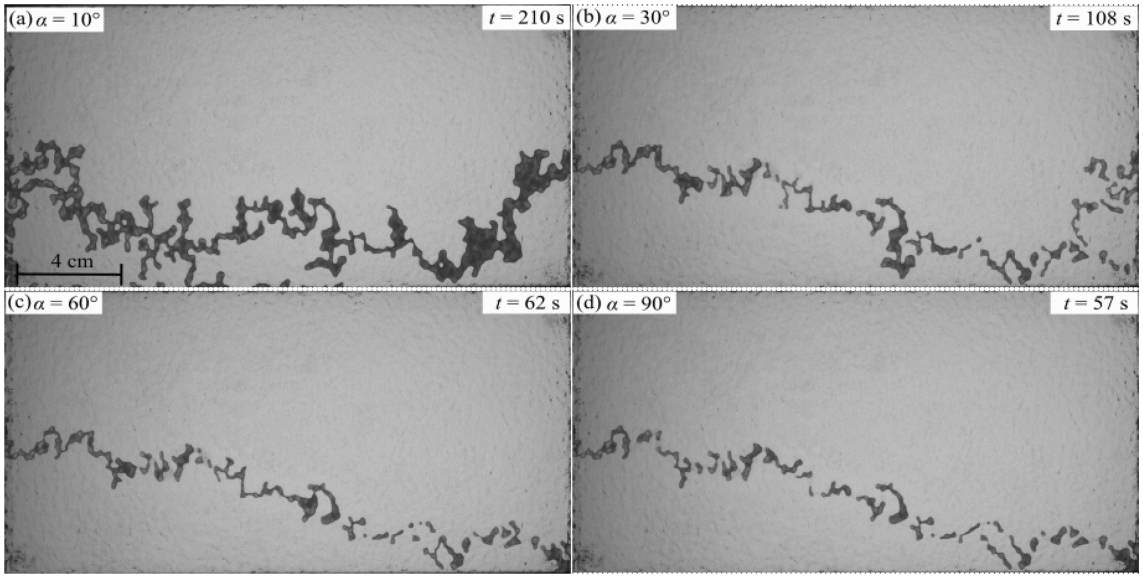


图 6　干燥裂隙中 LNAPL 迁移行为

Fig.6　The migration behavior of LNAPL in the initial dry fracture under different fracture inclination angle conditions

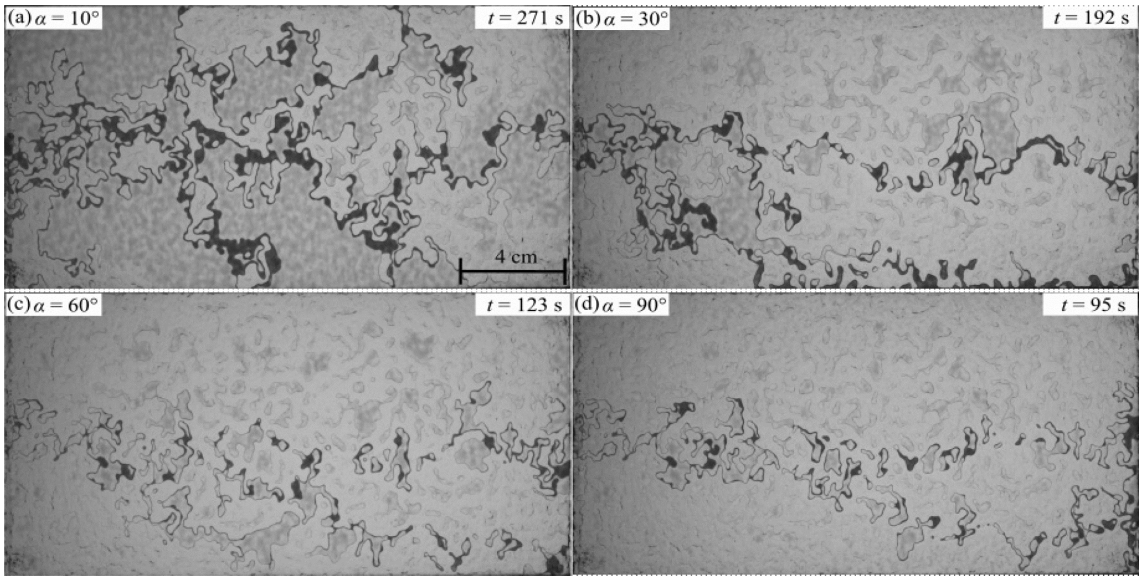


图 7　存水裂隙中 LNAPL 迁移行为

Fig.7　The migration behavior of LNAPL in water−entrapped fracture under different fracture inclination angle conditions

2.3　裂隙中 LNAPL 滞留特征分析

量化了干燥/存水裂隙中 LNAPL 迁移时横向扩展范围,并针对每组工况统计了其平均值和标准差(图 8),发现裂隙水的存在导致 LNAPL 横向迁移范围显著增大.这是由于干燥裂隙中非水相液体以指进形式流动,其影响范围 W 仅为指进宽度;而存水裂隙中非水相液体以膜状流形式流动,扩散范围更广.对于以优势流模式下渗(点源边界入渗)的 LNAPL 而言,在重力占优条件下(如 $\alpha \geqslant 30°$),干燥裂隙内指进宽度在 1~2cm,而膜状流横向影响范围主要在 4~8cm 之间,表明单裂隙存水可导致 LNAPL 横向扩散范围增大 3~5 倍(图 8b~d).在毛细力占优条件下(如 α=10°),干燥裂隙内指进宽度增大到 2~4cm,而膜状流横向影响范围增大到 8~10cm,迁移范围同样增大了 3~5 倍(图 7a);需要指出,此时膜状流扩散范围受到了裂隙模型宽度(=10cm)限制.

为定量化地评价重力变化对 LNAPL 滞留量的影响,采用了无量纲指标邦德数 Bo,定义为

$$\mathrm{Bo} = \frac{\Delta\rho_{\mathrm{La}} b^2 g \sin\alpha}{\sigma_{\mathrm{La}} \cos\theta_{\mathrm{La}}} \tag{1}$$

式中:$\Delta\rho_{La}$为LNAPL与空气的密度差;b为裂隙的平均开度;g 为重力加速度;α 为裂隙模型与水平面的夹角.LNAPL 滞留量随邦德数 Bo 的变化规律如图 9.总体而言,裂隙在垂直条件下(α=90°),LNAPL 滞留量最少;随着倾角减小,LNAPL 受到裂隙毛细力捕获作用逐渐增强,导致其滞留量逐渐增大.饱和度 S_L 与倾角 α 之间具有明显非线性关系,当倾角 α>30°时重力主导 LNAPL 迁移,饱和度 S_L 对倾角 α 变化不敏感;而当倾角 α<30°时毛细力逐渐占优,因此饱和度 S_L 随倾角 α 变化显著.进一步地发现不论裂隙倾角如何变化,存水裂隙中饱和度 S_L 是干燥裂隙的 1.5~2 倍,表明流动模式的转变能显著增强裂隙对 LNAPL 捕获能力.

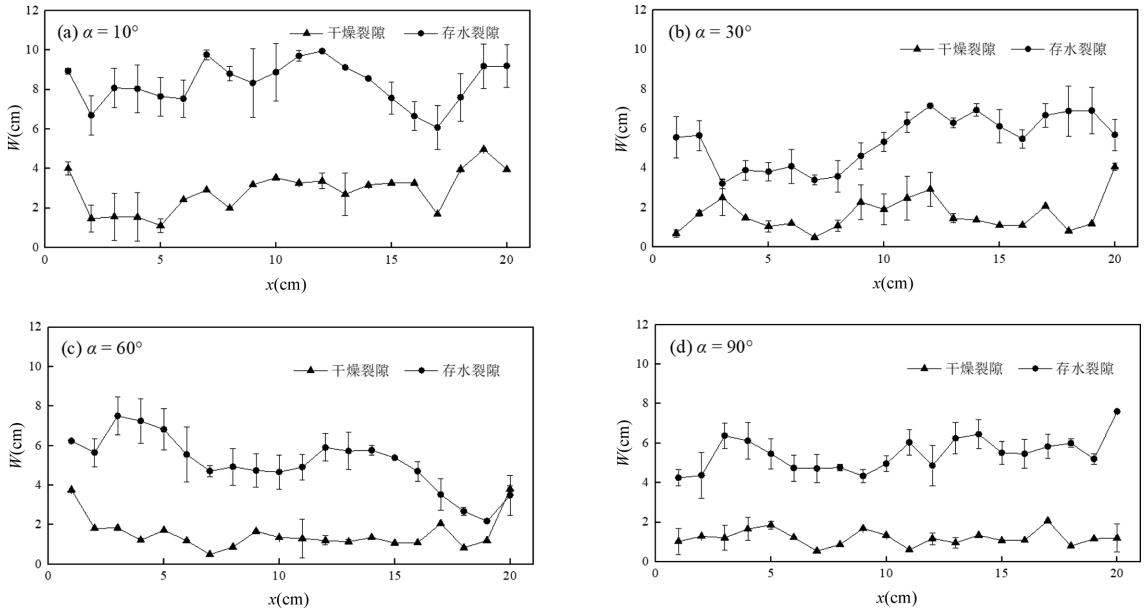


图 8 裂隙存水对 LNAPL 横向迁移范围的影响

Fig.8 The effect of entrapment water in fractures on LNAPL migration extent

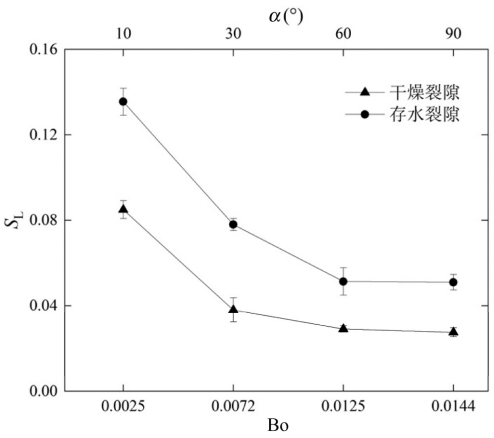


图 9 LNAPL 饱和度随 Bo 数演变

Fig.9 The evolution of LNAPL saturation with bond number

干燥/存水裂隙中 LNAPL 滞留区域对应的裂隙隙宽分布如图 10 所示.干燥裂隙中 LNAPL 滞留区的裂隙隙宽服从正态分布,其均值位于 0.2~0.3mm 之间;这与 Lu 等[19]开展的裂隙“LNAPL—水”两相流研究中 LNAPL 的滞留规律一致.存水裂隙(三相流系统)中 LNAPL 的滞留同样服从正态分布规律,其均值集中在 0.3~0.4mm 之间,高于干燥裂隙中的隙宽区间.这是由于指流形态下的 LNAPL 所承受的重力更集中,较大隙宽的裂隙容易发生排液行为;而膜状形态下 LNAPL 结构更发散,裂隙中所承受的重力更分散,因而可以被更大隙宽的裂隙滞留.此外,发现存水裂隙中 LNAPL 峰值频率更高,这是由于膜状流模式下迁移范围扩大导致更多 LNAPL 被滞留.

3 讨论

为了揭示膜状流形成的条件,分析了正辛烷侵入存水裂隙后形成的多相接触特征,发现存在着三种多相界线接触关系:正辛烷—气—玻璃、正辛烷—水—玻璃、正辛烷—水—气—玻璃.前述静态接触角测量已经表明正辛烷与水/气、玻璃三相接触形成稳定的球冠状液滴,而不是膜状铺展(图 2).进一步通过相机观测了正辛烷与空气、水之间的接触形态,发现正辛烷接触水面后会铺展开并形成一层膜状结构(图 11).这一现象表明,正辛烷沿水面铺展是导致膜状流形成的关键,与裂

隙壁面无关;故 LNAPL—水—气三相体系中膜状流是否出现取决于 LNAPL 在水面铺展特性.

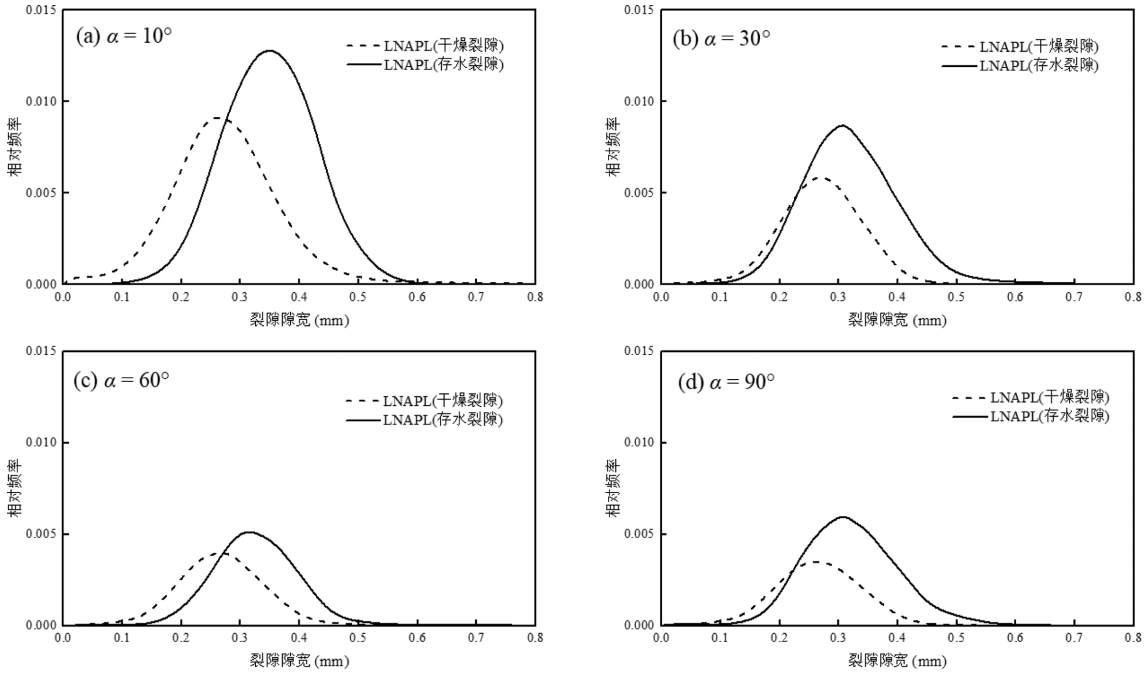


图 10　LNAPL 残留区域隙宽分布

Fig.10　The aperture distribution of the residual LNAPL region

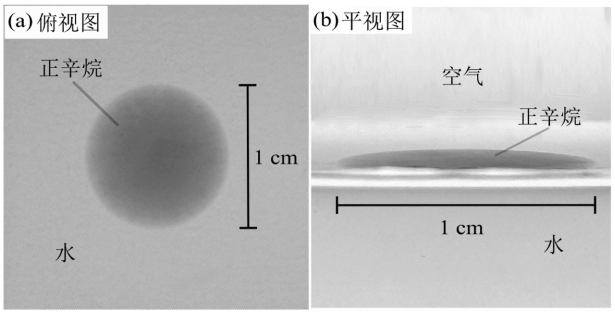


图 11　正辛烷在水面铺展状态

Fig.11　The Spreading state of n−octane on water surface

本研究中裂隙平均开度 $b \approx 0.3$mm,在多相流体系中水与正辛烷的静态接触角 θ_{wL}≈97°,计算毛细力($2\sigma_{wL}\cos\theta_{wL}/b$)约为 40Pa;而水与气之间的毛细力($2\sigma_{wa}\cos\theta_{wa}/b$)约为 280Pa;正辛烷与气之间的毛细力($2\sigma_{La}\cos\theta_{La}/b$)为 340Pa.这一结果表明,实验中毛细力对正辛烷和水之间的相互作用影响较弱,毛细力主要通过影响单相液体(LNAPL/水)滞留特性,进而间接影响膜状流动状态.对于不同种类的 LNAPL,水、LNAPL 和玻璃形成的静态接触角存在差异,因此两相液体(水和 LNAPL)界面毛细力对膜状流的影响还有待深入研究.此外,研究中采用了固定的注入流速,而实际上流速变化也会改变多相渗流形态产生[29],其影响仍需进一步研究.

4　结论

4.1　与干燥裂隙(LNAPL—气两相流动)相比,存水裂隙涉及 LNAPL、水、气三相流体间相互作用,导致 LNAPL 迁移和滞留行为更为复杂.试验结果表明:两相流条件下 LNAPL 以指进流形式迁移,而三相流条件下 LNAPL 以膜状流动为主;薄膜围绕水滴流动现象明显,运动路径更为曲折、横向迁移范围更广、滞留量更大.

4.2　薄膜流效应的强弱受裂隙存水的影响,与裂隙倾斜角度密切相关.随着裂隙与水平面倾斜角度的减小,一方面会导致裂隙存水能力增强,有利于膜状流产生;另一方面裂隙水滞留状态由离散小液滴转变为大斑块,有利于膜状 LNAPL 沿水滴边缘大范围迁移.相较于干燥裂隙,存水裂隙中 LNAPL 迁移影响范围是其 3~5 倍,LNAPL 滞留量是其 1.5~2 倍.干燥/存水状态下 LNAPL 滞留区裂隙隙宽均服从正态分布;但受膜状流的影响,存水状态下滞留区裂隙隙宽大于干燥状态下的隙宽,主要集中在 0.3~0.4mm 区间.

参考文献：

[1] Cavelan A, Golfier F, Colombano S, et al. A critical review of the influence of groundwater level fluctuations and temperature on LNAPL contaminations in the context of climate change [J]. Science of the Total Environment, 2022,806(Pt 1):150412.

[2] 阮冬梅,卞建民,王 倩,等.低渗透介质中轻非水相流体迁移转化规律 [J]. 中国环境科学, 2021,41(4):1815-1823.
Ruan D M, Bian J M, Wang Q, et al. The migration and transformation of light non-aqueous fluid in silty clay [J]. China Environmental Science, 2021,41(4):1815-1823.

[3] Essaid H I, Bekins B A, Cozzarelli I M. Organic contaminant transport and fate in the subsurface: Evolution of knowledge and understanding [J]. Water Resources Research, 2015,51(7):4861-4902.

[4] 孙 琳,张 敏,郭彩娟,等.非水相液体污染场地源区自然消除研究进展 [J]. 岩矿测试, 2022,41(5):704-716.
Sun L, Zhang M, Guo C J, et al. Review on the research progress of natural source zone depletion in LNAPL contaminated sites [J]. Rock and Mineral Analysis, 2022,41(5):704-716.

[5] 扶晓琴,施小清,蒋建国,等.寒区多孔介质中LNAPL迁移的多场耦合模拟 [J]. 中国环境科学, 2022,42(3):1346-1358.
Fu X Q, Shi X Q, Jiang J G, et al. Multi-field coupling simulation of LNAPL migration in cold regions [J]. China Environmental Science, 2022,42(3):1346-1358.

[6] Petri B G, Fucik R, Illangasekare T H, et al. Effect of NAPL source morphology on mass transfer in the vadose zone [J]. Groundwater, 2015,53(5):685-698.

[7] 杨 宾,李慧颖,伍 斌,等.4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究 [J]. 环境科学, 2013,34(4):1545-1552.
Yang B, Li H Y, Wu B, et al. Sand box study on fingering front morphology for NAPLs infiltrated in homogeneous porous media [J]. Environmental Science, 2013,34(4):1545-1552.

[8] Kechavarzi C, Soga K, Illangasekare T H. Two-dimensional laboratory simulation of LNAPL infiltration and redistribution in the vadose zone [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2005,76:211-233.

[9] 赵科锋,王锦国.包气带中裂隙对轻非水相流体运移和分布影响的模拟研究 [J]. 水利学报, 2016,47(7):891-899.
Zhao K F, Wang J G. Simulation of fracture impacts on light non-aqueous phase liquids migration and distribution in the unsaturated zone [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016,47(7):891-899.

[10] 肖岳峰,王锦国,黄 倩,等.LNAPL 在含裂隙层状非均质地层中运移模拟研究 [J]. 水文地质工程地质, 2017,44(1):23-30.
Xiao Y F, Wang J G, Huang Q, et al. A simulation study of LNAPL migration in layered heterogeneous porous media containing fractures [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017,44(1):23-30.

[11] 卢 斌,邵军荣,张 源,等.裂隙地下水中残留LNAPL物理驱替冲洗实验 [J]. 中国环境科学, 2020,40(1):182–189.
Lu B, Shao J R, Zhang Y, et al. Physical displacement and flush of entrapped LNAPL in fractured media groundwater [J]. China Environmental Science, 2020,40(1):182-189.

[12] Oostrom M, Dane J H, Wietsma T W. A review of multidimensional, multifluid, intermediate-scale experiments: flow behavior, saturation imaging, and tracer detection and quantification [J]. Vadose Zone Journal, 2007,6(3):610-637.

[13] 邓亚平,张 烨,施小清,等.非均质裂隙介质中重非水相流体运移 [J]. 水科学进展, 2015,26(5):722-730.
Deng Y P, Zhang Y, Shi X Q, et al. Study on the migration of dense non-aqueous phase liquids in heterogeneous fractured media [J]. Advances in Water Science, 2015,26(5):722-730.

[14] Loggia D, Bo Z, Xiao L, et al. Experimental study of upward oil migration in a fracture [J]. Transport in Porous Media, 2009,80(1):1-16.

[15] Geller J T, Holman H Y, Su G, et al. Flow dynamics and potential for biodegradation of organic contaminants in fractured rock vadose zones [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2000,43(1):63-90.

[16] Lee H B, Yeo I W, Ji S H, et al. Wettability-dependent DNAPL migration in a rough-walled fracture [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2010,113(1):44-55.

[17] Nicholl M J, Glass R J. Infiltration into an analog fracture [J]. Vadose Zone Journal, 2005,4(4):1123-1151.

[18] Alraoush R I. Experimental investigation of the influence of grain geometry on residual NAPL using synchrotron microtomography [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2014,159:1-10.

[19] Lu B, Wu S, Xie X, et al. The behaviors of LNAPL migration and entrapment in a rough-walled vertical fracture [J]. Geosciences Journal, 2017,21(3):407-416.

[20] 卢 斌,吴时强,谈叶飞,等.单裂隙中LNAPL残留特点及残留体对水流运动的影响 [J]. 水科学进展, 2015,26(1):107-113.
Lu B, Wu S Q, TAN Y f, et al. Characterization of residual LNAPL and effect of LNAPL entrapment configuration on water flow in a single fracture [J]. Advances in Water Science, 2015,26(1):107-113.

[21] Yang Z, Niemi A, Fagerlund F, et al. Effects of single-fracture aperture statistics on entrapment, dissolution and source depletion behavior of dense non-aqueous phase liquids [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2012,133:1-16.

[22] Dou Z, Li J J, Wei Y B, et al. Influence of initial water saturation on three-phase displacement efficiency and residual distribution during NAPL invasion into unsaturated porous media based on low-field NMR [J]. Journal of Hydrology, 2023,619:129302.

[23] 郑德凤,赵勇胜,王本德.轻非水相液体在地下环境中的运移特征与模拟预测研究 [J]. 水科学进展, 2002,13(3):321-325.
Zheng D F, Zhao Y S, Wang B D. Research on the moving behaviors and modeling of light non-aqueous phase liquids in subsurface [J]. Advances in Water Science, 2002,13(3):321-325.

[24] Schnaar G, Brusseau M L. Characterizing pore-scale configuration of organic immiscible liquid in multiphase systems with synchrotron X-Ray microtomography [J]. Vadose Zone Journal, 2006,5(2):641-648.

[25] Dou Z, Zhang X, Zhuang C, et al, Saturation dependence of mass transfer for solute transport through residual unsaturated porous media [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022,188,122595.

[26] Dou Z, Chen Y Q, Zhuang C, et al. Emergence of non-aqueous phase liquids redistribution driven by freeze-thaw cycles in porous media based on low-field NMR [J]. Journal of Hydrology, 2022,612(PA),128106.

[27] 覃荣高,邱仁敏,黎 明,等.包气带—含水层地下水污染风险评估研究进展 [J]. 地球科学进展, 2020,35(2):111-123.
Qin R G, Qiu R M, Li M, et al. Review of study on groundwater contamination risk assessment in vadose zone-aquifer [J]. Advances in Earth Science, 2020,35(2):111-123.

[28] Detwiler R L, Pringle S E, Glass R J. Measurement of fracture aperture fields using transmitted light: An evaluation of measurement errors and their influence on simulations of flow and transport through a single fracture [J]. Water Resources Research, 1999,35(9):2605-2617.

[29] Chen Y F, Fang S, Wu D S, et al. Visualizing and quantifying the crossover from capillary fingering to viscous fingering in a rough fracture [J]. Water Resources Research, 2017,53(9):7756-7772.

作者简介：薛 松(1992-),男,湖北荆州人,副教授,博士,主要从事地下水渗流与污染物运移研究.发表论文 20 余篇.xuesong@ctgu.edu.cn.