

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.01.014

单裂隙中 LNAPL 残留特点及残留体对水流运动的影响

卢 斌^{1,2}, 吴时强¹, 谈叶飞¹, 俞双恩², 谢兴华¹

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 轻非水相液体(LNAPL)在变隙宽裂隙中的迁移和残留机理复杂,在“裂隙-水-LNAPL”三相系统中, LNAPL和 水流运动之间相互作用和影响,同时两者又共同受到裂隙表面和隙宽的影响和控制。采用 27.4 cm×20.0 cm(长×宽)的透明仿真裂隙开展甲苯(地下水中常见的 LNAPL 污染物之一)迁移试验,监测并获取变隙宽裂隙中 LNAPL 的迁移过程与残留分布的图像,通过数学统计和数值模拟的方法,分别揭示 LNAPL 残留分布规律以及“裂隙-水-LNAPL”系统内的相互影响机制。研究表明:自由相的 LNAPL 主要沿着裂隙中的狭长通道迁移到内部,在隙宽较小的区域有少量孤立的 LNAPL 液滴残留。LNAPL 在变隙宽裂隙中的迁移、残留与裂隙隙宽的分布密切相关, LNAPL 残留的隙宽符合正态分布规律。甲苯残留的隙宽分布范围为 0.01~1.40 mm,残留最多的隙宽分布在 0.20~0.30 mm。LNAPL 的残留增大了裂隙内水流运动的阻力,使得裂隙两端的压力差增加。LNAPL 残留使裂隙内水流流速重新分布,同时也改变了裂隙原有的沟槽流分布和数量。

关键词: 变隙宽裂隙; 轻非水相液体; 残留结构; 隙宽; 水流运动

中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2015)01-0107-07

地下水一旦受到污染,就很难治理和恢复。主要因为其流速极其缓慢,切断污染源后仅靠含水层本身的自然净化,所需时间长达数十年、上百年。另一个原因是某些污染物被介质和有机质吸附后,会发生解吸、再吸附的反复交替。在众多的地下水污染物中,非水相液体(Non-Aqueous Phase Liquids, NAPLs)污染已经成为世界性的环境问题。残留的 NAPL 是地下水污染物的长期来源,通过抽出处理的方法不可能把污染完全修复^[1]。

关于 NAPL 在孔隙、裂隙介质中迁移过程的试验研究很多。NAPL 的迁移和残留机理复杂,受到多种因素的影响。包括介质的几何特征(如多孔介质的孔隙结构、裂隙介质的隙宽分布、粗糙性等),流体的性质(如密度、黏滞性),流固界面性质(如固体表面湿润性)以及 NAPL 的受力情况。Lee 等^[2]利用玻璃仿真裂隙研究了裂隙面湿润性对重非水相液体(DNAPL)迁移的影响,研究发现,裂隙表面亲水时 DNAPL 以不连续液滴通过较大隙宽,表面疏水时,毛细管压力迫使 DNAPL 通过较小的裂隙。Longino 和 Kueper^[3]调查了 PCE 在灰岩层理面和缝合面两种裂隙中的残留能力,结果表明, PCE 的残余饱和度在裂隙水平状态时最大,在垂直状态时最小。NAPL 的残留能力与毛细管数 N_c 和邦德数 N_b 的组合数表现出很强的相关性。

关于残留 NAPL 的分布与形态研究在多孔介质中较多^[4-6]。多孔介质的空间分布结构极为复杂,残留 NAPL 液滴的大小和形态差异很大,从直径约 0.03 mm 的微小液滴到 4~5 mm 长的无定形液滴均有分布^[6]。与多孔介质相比,裂隙介质中 NAPL 残留主要与裂隙隙宽分布有关。Karpyn 等^[7]利用微 CT 扫描技术研究了砂岩岩心裂隙中的油水两相流运动与流体分布。在试验中观察了流体残留、优先流通道和非湿润相截断等机制。结果表明,流体的分布主要取决于裂隙的几何形状、饱和度和岩石的湿润性。Geller 等^[8]通过透明裂

收稿日期: 2014-03-11; 网络出版时间: 2014-12-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20141225.1509.014.html>

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201401083); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2011110)

作者简介: 卢斌(1985—),男,江苏赣榆人,博士研究生,主要从事地下水污染与修复方面研究。

E-mail: lubeing@126.com

通信作者: 吴时强, E-mail: sqwu@nhri.cn

隙内不同流体(水、十二烷、四氯乙烯)的下渗试验,识别出流体在裂隙中分布的重要特征。Weerakone等^[9]利用X射线计算机断层扫描研究了岩石裂隙中的单相流(盐水)和两相流(DNAPL-盐水)的流动与分布特点。

相比较而言,国内对于NAPL污染的研究较少且发展缓慢,大多数研究针对多孔介质。如郑德凤等^[10]、刘汉乐等^[11]、邢巍巍和胡黎明^[12]分别进行了二维或三维砂箱模型试验,得到轻非水相液体(LNAPL)在多孔介质中的入渗、迁移规律以及分布特征。施小清等^[13]、李宏和Ranjith^[14]使用不同的数值模拟方法模拟了NAPL在非均质介质中的运移过程。

渗漏到裂隙中的NAPL迁移缓慢,一旦残留后更难移动,造成了去除和修复困难。目前,对于LNAPL在裂隙中的迁移和残留研究较少,且研究往往关注于“LNAPL-水”的两相流运动。对于残留的LNAPL而言,这些残留体移动困难,污染物主要通过污染羽随水流运动扩散。因此,对粗糙裂隙中LNAPL的残留分布特征及其对水流路径影响的研究具有重要意义。本研究主要使用透明仿真裂隙开展试验,获取变隙宽裂隙中LNAPL的迁移过程与残留分布图像,并通过数学统计和数值模拟的方法,揭示LNAPL残留分布规律以及“裂隙-水-LNAPL”系统间的相互影响机制。

1 试验材料与方法

1.1 裂隙材料与隙宽获取

本研究主要使用光学成像的方法进行试验观测,因此需要制作出透明的高仿真粗糙裂隙物理模型。透明仿真裂隙以页岩粗糙裂隙为原型,通过翻模后熔化玻璃烧制形成。透明玻璃裂隙面具有页岩粗糙裂隙面相同的肌理,同时能够方便观察裂隙内部的情况,可用于进行裂隙水流运动与NAPL迁移等试验研究。

另外,为了精确描述裂隙特征和建立数字几何模型,使用MetraScan 210(Creaform, Canada)三维激光扫描仪对页岩裂隙粗糙表面进行数据采集。为了确保重建的裂隙能与原始裂隙保持一致,扫描时先分别独立扫描裂隙的上下两个表面,然后扫描裂隙合并后试件的四周轮廓面,以作为三维重建时的匹配参考。裂隙面重建采样精度为1 mm,生成200×274点云矩阵,重建的隙宽分布及其统计分析结果见图1。

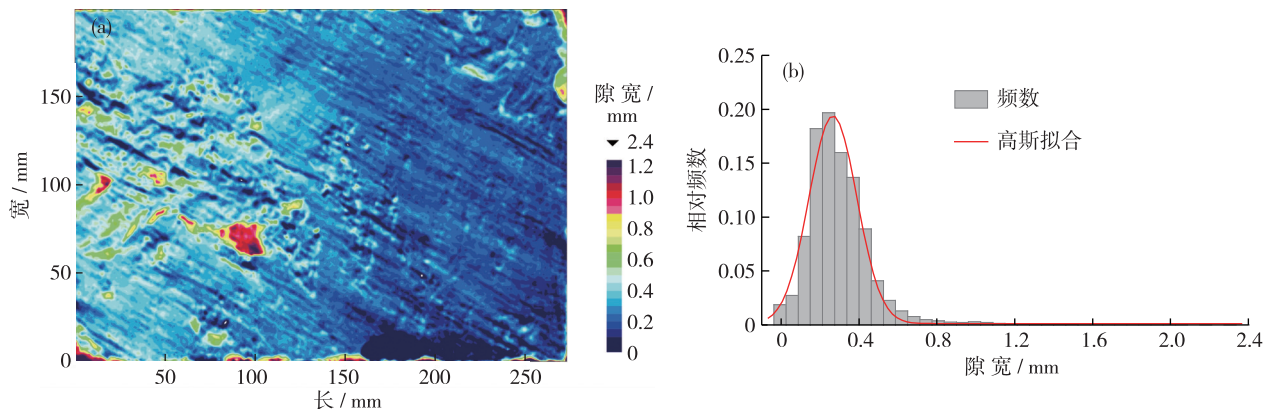


图1 粗糙裂隙隙宽分布

Fig. 1 Aperture distribution of rough-walled fracture

扫描重建裂隙的平均隙宽为0.298 mm。由图1(b)可见,隙宽分布符合正态分布规律且存在拖尾现象。这种拖尾现象与页岩裂隙的制作有关,在试件四周的打磨过程中会造成边缘区域有细小碎屑剥落,导致出现隙宽大的区域,在图1(a)上可以看到这些区域。

1.2 试验步骤与分析方法

试验选用甲苯作为LNAPL污染源,甲苯的分子式为 $C_6H_5CH_3$,比重为0.866,水中溶解度为535 mg/L。

试验中水使用亮蓝 FCF 标记, 以便更好地分辨出水-LNAPL 两相界面。

仿真裂隙固定于可旋转的不锈钢框架上, 裂隙下部装有均匀光源便于观测裂隙内部。裂隙进出口端分别连接有机玻璃部件, 预留小孔可安装测压管观测裂隙两端的水头。水流运动通过蠕动泵控制, 为了减小蠕动泵的脉动影响, 在进水端装有脉动缓冲器。

仿真裂隙内 LNAPL 迁移、残留试验示意图 2, 具体操作步骤如下: ① 将裂隙注水饱和后, 关闭裂隙两端控制阀门, 从裂隙进口端(右侧)的有机玻璃部件中间的小孔缓慢注入甲苯约 4 mL; ② 将裂隙出口段向上调成与水平方向约为 40° 倾斜角的位置(这里为了加快 LNAPL 的迁移速度, 缩短试验时间), 打开两端控制阀门, 通过蠕动泵从进口向裂隙内低速注水(流量约 0.01 mL/s), 使甲苯缓慢向上迁移并残留; ③ 当 LNAPL 即将到达裂隙出口端(左侧)时, 关闭蠕动泵和出口阀门, 将裂隙重新调至水平状态, 同时减小进口端水流流速。

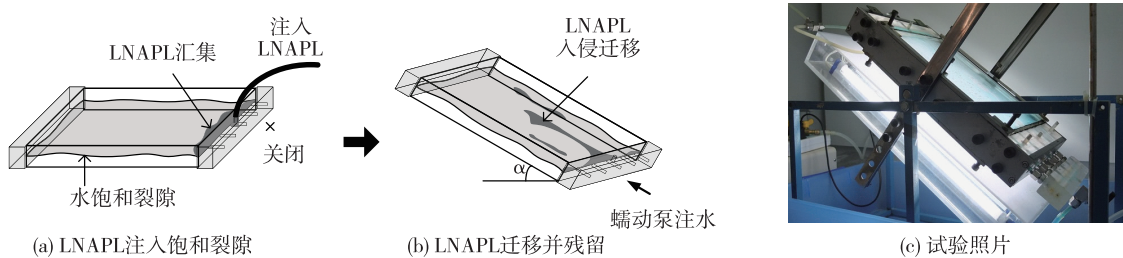


图 2 饱和单裂隙中 LNAPL 迁移和残留试验步骤

Fig. 2 Experimental procedure of LNAPL migration and entrapment in a single fracture

在试验过程中使用数码相机进行拍照记录, 后期通过数字图像处理方法提取“水-LNAPL”两相界面的轮廓线, 得到 LNAPL 迁移过程与残留结构分布图。然后对残留隙宽及残留液滴特征进行统计分析: ① 将 LNAPL 残留图像与裂隙隙宽分布图匹配, 并统计对应残留隙宽的分布规律; ② 将提取的 LNAPL 残留结构轮廓线导入 CAD 中, 并计算残留 LNAPL 的周长、面积和最大长度等几何特征。

1.3 裂隙水流数值模拟

以物模试验最终得到的 LNAPL 分布结构作为“残留 LNAPL 的初始状态”, 使用数值模拟方法研究裂隙内部水流运动状况。在这个残留初始状态下, 残留的 LNAPL 视为不动相, 数值模拟只关注水流的运动。通过后续的物模试验观察, 在裂隙水流速度非常缓慢的条件下, 残留的 LNAPL 移动极为缓慢, 需要几天的时间才能观察到明显的变化。模拟中忽略 LNAPL 的溶解、吸附等问题。

仿真单裂隙中的水流运动可以看作为承压稳定流, 水流运动的控制方程可描述为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_i b_i \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_i b_i \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

式中 K 为渗透系数, $[LT^{-1}]$; b 为隙宽, $[L]$; H 为压力水头, $[L]$ 。

对于二维变隙宽裂隙, 平面内各点的渗透系数 K 可通过立方定律反算得到:

$$K = \frac{\rho g b^2}{12\mu} \quad (2)$$

式中 μ 为水流动力粘滞系数, $[ML^{-1}T^{-1}]$; ρ 为水的密度, $[ML^{-3}]$; g 为重力加速度, $[LT^{-2}]$ 。

使用有限元地下水模拟系统 FEFLOW 6.0 (WASY, Germany) 建立二维变隙宽裂隙模型, 分析比较裂隙水流流场的变化规律。裂隙两个侧面设定为不透水边界, 进水端为第二类边界条件, 出水端为自由排水边界。使用 FEFLOW 的参数关联功能, 赋予粗糙裂隙的导水系数 T 参数值。导水系数与渗透系数的关系为 $T=bK$, 变隙宽裂隙渗透系数 K 由式(2)确定。由于 LNAPL 残留的区域水流不通过, 可将这些区域设置为极小的导水系数 $1 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

2 结果与分析

2.1 粗糙裂隙内 LNAPL 迁移过程

通过提取“水-LNAPL”两相界面的轮廓线,得到 LNAPL 在粗糙裂隙内迁移的主要过程(图 3)。图 3(a)为 LNAPL 注入裂隙时的初始状态分布图。此时, LNAPL 还没有全部进入裂隙内部,仍有大量的 LNAPL 滞留在注射孔和软管内。由于裂隙右上方隙宽较大,自由相的 LNAPL 整体向该区域移动。图 3(b)为 LNAPL 迁移 30 min 时的分布图,由图 3(b)可见,大部分的 LNAPL 沿中间的狭长通道移动到裂隙内部, LNAPL 主体部分已移动至裂隙中间位置,尾部形成细长的“拖拽”形态。同时,左右两侧有少量孤立的 LNAPL 液滴残留。图 3(c)为 LNAPL 迁移 60 min 时的分布图,此时,中间的 LNAPL 主体部分①和尾部④之间已经断裂,主体①前锋快要到达裂隙出口,形态变得更为复杂。两侧的 LNAPL 整体变化较小,形成②和③两个较大的残留块。

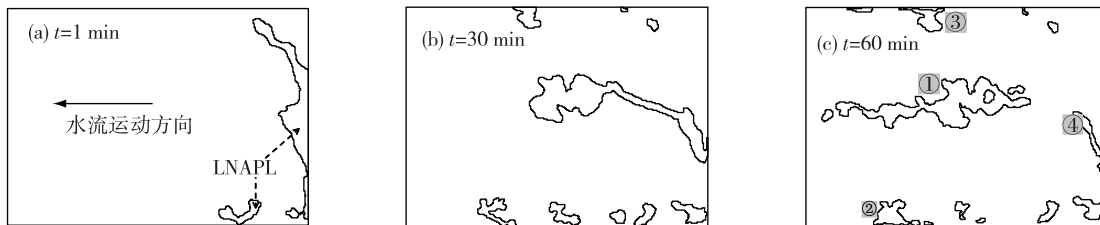


图 3 LNAPL 在裂隙中沿水流运动方向迁移主要过程

Fig. 3 LNAPL migration in the rough-walled fracture at different stages

对 NAPL 在多孔介质中迁移、残留的研究,认为孔隙中 NAPL 的残留机制主要有两种^[15-16]:截断和分流。对于裂隙介质中 NAPL 的残留机制相似,在变隙宽裂隙中,裂隙断面隙宽的变化和平面沟槽分布情况对 NAPL 的迁移路径和残留分布有着重要影响。LNAPL 在倾斜裂隙中迁移时,水流的浮力和挤压作用力为主要驱动力,同时又受到重力、毛细压力及粘滞力的阻滞作用。又由于界面张力的存在,使得 LNAPL 在迁移过程中形成曲折的相界面。自由相 LNAPL 可以不断地向更深的地方迁移,当 LNAPL 来源不足时,会导致毛管边缘的 LNAPL 断裂成独立的液滴。

由隙宽分布图可知沿裂隙下边缘为大小隙宽间隔出现,当 LNAPL 量较多时可以通过,但尾部的 LNAPL 在通过小隙宽区时会被截断,因此,裂隙下边缘残留的 LNAPL 小液滴呈现间断分布。

裂隙中部偏左下方的大隙宽区域流速较大,以水流占据主导,如果 LNAPL 不是一直沿着这条沟槽迁移,就很难再进入其中。由于 LNAPL 主体部分在这条通道的上方, LNAPL 会受到水流的挤压作用,因此, LNAPL 不会通过该大隙宽区域。

将图 3(c)中 LNAPL 的分布作为水平裂隙中 LNAPL 残留的初始状态,分析残留 LNAPL 结构特征、分布规律以及模拟 LNAPL 残留形态对于水平裂隙水流运动的影响。

2.2 LNAPL 残留特征与分布规律

图 3(c)中 LNAPL 的残留体共有 15 个,对其中 4 个典型残留体的几何特征统计列于表 1 中。LNAPL 分布总面积为 48.62 cm^2 ,“LNAPL-水”接触界面总周长为 161.39 cm 。残留 LNAPL 的复杂结构增加了 LNAPL 与水的有效界面面积,这使得相同体积的 LNAPL 在水中的溶解速度更快,同时也增大了污染物扩散的范围。

LNAPL 在变隙宽裂隙中的迁移和残留与裂隙隙宽的分布紧密相关,经过统计分析得到甲苯残留隙宽的分布规律见图 4。结果表明,甲苯残留的隙宽符合正态分布规律。甲苯残留的隙宽分布范围为 $0.01 \sim 1.40 \text{ mm}$,甲苯残留最多的隙宽分布在 $0.20 \sim 0.30 \text{ mm}$ 。这与 Karpyn 等^[7]通过 CT 扫描得到岩石粗糙裂隙中不相混流体通过的隙宽频率呈正态分布规律的结论一致。

表 1 典型 LNAPL 残留体几何特征

Table 1 Statistics of LNAPL entrapment configuration

编号	面积/cm ²	周长/cm	最大长度/cm
①	28.32	64.07	17.75
②	4.82	17.04	4.13
③	3.57	14.94	4.21
④	2.36	12.83	4.86

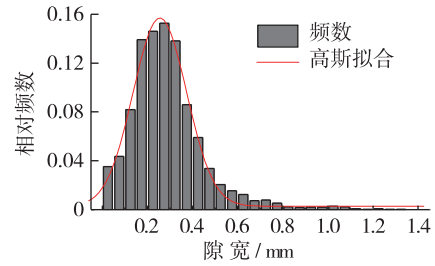


图 4 甲苯残留隙宽频数分布直方图

Fig. 4 Frequency histogram of clogged aperture

2.3 残留 LNAPL 形态对水流运动的影响

粗糙裂隙内部水流运动二维数值模拟结果见图 5。模拟水流运动的方向为从右向左, 进水流量 q 为 $0.1 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。从饱和裂隙流速分布图可以看出, 水流运动表现出强烈的沟槽流现象。从整体上看, 这些沟槽基本呈平行倾斜走势, 与隙宽分布规律一致。

LNAPL 残留后使裂隙内水流流速重新分布。由流速分布图可见, 由于 LNAPL 的残留, 造成未残留的一些区域流速增大, 特别是位于残留体①和③之间的区域。而残留 LNAPL 的分布结构又造成了一些拐角区域和背水面的流速非常小。另外, LNAPL 残留也改变了裂隙原有的沟槽流分布情况, 中间的 LNAPL 残留体隔断了两侧水流的连通, 由于两侧流速增大, 临近的小沟槽流汇集成较大的沟槽流。还有一些区域受 LNAPL 残留的影响, 原有的沟槽流消失。

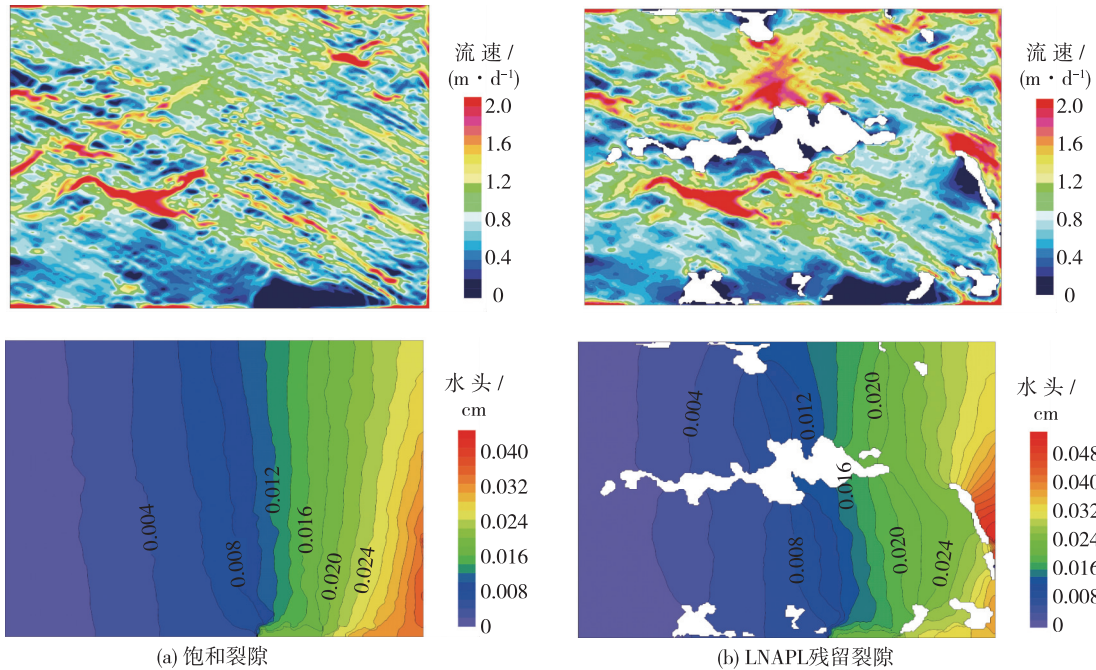


图 5 裂隙残留前后流速与水头分布对比

Fig. 5 Flow velocity and water head distribution before and after LNAPL entrapment

LNAPL 残留也对裂隙压力水头的分布造成了显著影响。残留后裂隙两端的水头差略有增加, 这是由于 LNAPL 的残留增大了裂隙内水流运动阻力。其中, 位于裂隙进口端的 LNAPL 残留体对水流的阻滞作用尤为明显。另外, 裂隙中间大的 LNAPL 残留结构对水头分布的影响也很大。

3 结 论

“裂隙-水-LNAPL”系统中, LNAPL 和水流运动之间相互作用和影响, 两者共同受到裂隙表面和隙宽的影响和控制。一方面, 在 LNAPL 迁移过程中, LNAPL 的分布形态和迁移路径的形成受到多种因素控制, 其中隙宽分布和水流作用是两个重要因素。试验结果表明, 自由相的 LNAPL 主要沿裂隙中的狭长通道迁移到内部, 在隙宽较小的区域有少量孤立的 LNAPL 液滴残留。LNAPL 在变隙宽裂隙中的迁移和残留与裂隙隙宽分布紧密相关, 试验得到甲苯残留的隙宽符合正态分布规律。甲苯残留的隙宽分布范围为 0.01~1.40 mm, 甲苯残留最多的隙宽分布在 0.20~0.30 mm。另一方面, LNAPL 残留结构形态的改变也对水流运动产生重要影响。首先, LNAPL 的残留增大了裂隙内水流运动的阻力, 使得裂隙两端的水头差增加。其次, LNAPL 残留体占据了裂隙内部分沟槽通道, 使裂隙内水流流速重新分布, 同时也改变了裂隙原有的沟槽流分布和数量, 进而影响到污染物的扩散和运移。

总之, 裂隙中残留 LNAPL 的危害主要表现在: LNAPL 残留体具有不规则结构, 增加了“水-LNAPL”的有效界面面积, 残留的 LNAPL 又使局部水流流速增加, 造成相同体积的 LNAPL 会溶解得更快, LNAPL 污染羽扩散范围扩大。另外, 在窄隙宽区域有 LNAPL 小液滴残留, 这些区域地下水流速很小, 残留的小液滴移动和去除非常困难。

参考文献:

- [1] 贝迪恩特, 里法尔, 纽厄尔. 地下水污染: 迁移与修复[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (BEDIENT P B, RIFAI H S, NEWELL C J. Groundwater contamination: Transport and remediation[M]. 2ndEd. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))
- [2] 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.
- [3] LONGINO B L, KUEPER B H. Nonwetting phase retention and mobilization in rock fractures[J]. Water Resources Research, 1999, 35(7): 2085-2093.
- [4] SINGH K, NIVEN R K, SENDEN T J, et al. Remobilization of residual non-aqueous phase liquid in porous media by freeze-thaw cycles[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(8): 3473-3478.
- [5] GOLDSTEIN L, PRASHER S O, GHOSHAL S. Three-dimensional visualization and quantification of non-aqueous phase liquid volumes in natural porous media using a medical X-ray computed tomography scanner[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2007, 93(1): 96-110.
- [6] SCHNAAR G, BRUSSEAU M L. Pore-scale characterization of organic immiscible-liquid morphology in natural porous media using synchrotron X-ray microtomography[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(21): 8403-8410.
- [7] KARPYN Z T, GRADER A S, HALLECK P M. Visualization of fluid occupancy in a rough fracture using micro-tomography[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2007, 307(1): 181-187.
- [8] 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.
- [9] WEERAKONE W, WONG R C K, MEHROTRA A K. Single-phase (Brine) and two-phase (DNAPL-Brine) flows in induced fractures[J]. Transport in Porous Media, 2011, 89(1): 75-95.
- [10] 郑德凤, 赵勇胜, 王本德. 轻非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 Defeng, ZHAO Yongsheng, WANG Bende. Research on the moving behaviors and modeling of light non-aqueous phase liquid in subsurface[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(3): 321-325. (in Chinese))
- [11] 刘汉乐, 周启友, 吴华桥. 基于高密度电阻率成像法的轻非水相液体饱和度的确定[J]. 水利学报, 2008, 39(2): 189-195. (LIU Hanle, ZHOU Qiyu, WU Huaqiao. Determination of saturation distribution of light non-aqueous phase liquid based on electric resistivity tomography[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(2): 189-195. (in Chinese))

- [12] 邢巍巍, 胡黎明. 轻非水相流体污染物运移的离心模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(3): 341-345. (XING Weiwei, HU Liming. Centrifuge modeling of light non-aqueous phase liquid migration[J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 2006, 46(3): 341-345. (in Chinese))
- [13] 施小清, 姜蓓蕾, 吴吉春, 等. 非均质介质中重非水相污染物运移受泄漏速率影响数值分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(3): 376-382. (SHI Xiaoqing, JIANG Beilei, WU Jichun, et al. Numerical analysis of the effect of leakage rate on dense non-aqueous phase liquid transport in heterogenous porous media[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(3): 376-382. (in Chinese))
- [14] 李宏, RANJITH P G. 地下水中非水相流体污染运移的三维有限元法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2509-2516. (LI Hong, RANJITH P G. Three-dimensional finite element method for nonaqueous phase liquids contaminant transport in groundwater[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2509-2516. (in Chinese))
- [15] CHATZIS I, MORROW N R, LIM H T. Magnitude and detailed structure of residual oil saturation[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1983, 23(2): 311-326.
- [16] BERGSLIEN E, FOUNTAIN J. The effect of changes in surface wettability on two-phase saturated flow in horizontal replicas of single natural fractures[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2006, 88(3): 153-180.

Characterization of residual LNAPL and effect of LNAPL entrapment configuration on water flow in a single fracture *

LU Bin^{1,2}, WU Shiqiang¹, TAN Yefei¹, YU Shuang'en², XIE Xinghua¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The mechanism becomes very difficult to realize when light non-aqueous phase liquid (LNAPL) migrates with residue in the variable-aperture fracture. The immiscible liquids in the 'fracture-water-LNAPL' system can affect and interact with one another. Meanwhile, these liquids are confined and controlled by the fracture surfaces and the aperture. We performed a toluene migration experiment with the use of a transparency replica fracture with a length of 27.4 cm and a width of 20.0 cm. Some LNAPL migration images and entrapment configuration were first acquired. We then analyzed the geometric characteristics of the LNAPL entrapment configuration and clogged aperture. We also compared the water flow in the fracture before and after LNAPL entrapment through numerical modeling. Results show that free phase LNAPL invaded the fracture through a gallery with large aperture, and some isolated LNAPL blobs were entrapped at a tight aperture area. The location of the LNAPL migration and residue is closely related to the aperture, and the frequency of the clogged aperture followed a normal distribution. The range of the clogged aperture is from 0.01 mm to 1.40 mm, whereas the distribution centered at 0.20 mm to 0.30 mm. As the water flow resistance was increased in the entrapment configuration, the pressure difference between the inlet and outlet increased after the entrapment. Residual LNAPL caused water flow velocity redistribution, and changed the distribution and amount of channel flow.

Key words: variable-aperture fracture; light non-aqueous phase liquid; entrapment configuration; aperture; water flow

* The study is financially supported by the National Non-Profit Research Program of China (No. 201401083).