中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

非饱和花岗岩残积土水-气两相驱替过程数值模拟

蔡沛辰,阙 云,李 显

Numerical simulation of water-gas two-phase displacement process in unsaturated granite residual soil

CAI Peichen, QUE Yun, and LI Xian

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202010017

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

井内嵌入同轴多孔与固体圆柱地下水渗流流型分析

Flow pattern analysis around a solid cylinder with both porous and water rings in porous media 朱琳, 雷海燕, 马非, 戴传山 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 25–31

含单裂隙非饱和带中轻非水相流体修复的数值模拟

Numerical simulation of light non-aqueous phase liquids remediation in the unsaturated zone with single fractures 赵科锋, 王锦国, 曹慧群 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 43-55

非均匀多孔介质等效渗透率的普适表达式

A universal expression of the equivalent permeability of heterogeneous porous media 张东, 刘晓丽, 王恩志 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 35–42

东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟

Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China

张晨阳, 张泰丽, 张明, 孙强, 伍剑波, 王赫生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 42-50

多孔介质界面对重非水相液体迁移过程影响的图像法研究

Investigation on the influence of porous media interface on DNAPL migration based on image methods 刘汉乐, 郝胜瑶, 马建初 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 169–174

全风化花岗岩地层中高固相离析浆液灌浆机理研究

A study of grouting mechanism of high solid phase segregation grout in fully weathered granite 赵钰, 郑洪, 曹函, 林飞, 王旭斌, 贺茉莉 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 78–88



DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202010017

非饱和花岗岩残积土水-气两相驱替过程数值模拟

蔡沛辰,阙 云,李 显 (福州大学土木工程学院,福建 福州 350108)

摘要:水流在非饱和土体中的人渗过程实质上是水在下渗的过程中驱替空气的两相流问题。为揭示非饱和花岗岩残积土水-气两相驱替动态渗流机理,选取福州某地原状花岗岩残积土作为研究对象,基于工业 CT 扫描图像与 Level Set 方法,研究了原状土样两相驱替的动态特征。结果表明:对于细观尺度水-气两相驱替模拟, Level Set 法能很好地捕捉两种不混溶流体间的界面位置;水-气两相驱替过程存在大孔隙优先流特征,且"绕流"现象一般易于出现在孔隙成圆度较高处;两相渗流速度主要受孔道迂回度控制,笔直、较宽孔道,渗流速度相对较高,同时存在明显的"优势通道",且随渗流时间增大以先急后缓的特征呈正相关变化,最大增速率为 10.77%,最小仅 1.90%; 孔道横截面速度大小分布与孔隙结构有关,"回流"和"绕流"现象会使驱替速度骤降,降低幅度可达 21.62%; 驱替阻力最大出现在孔壁处,孔道越窄,阻力越大; 驱替效率与驱替压差成正比关系,且初期加压增速效果显著,可达 25.49%,后期仅为 1.47%。该研究成果可丰富降雨型滑坡理论基础并预防灾害产生,具有重要的理论价值及工程意义。

关键词: 非饱和花岗岩;残积土; CT 扫描切片; 多孔介质; Level Set; 水-气两相驱替

中图分类号: P641.2; TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)06-0054-10

Numerical simulation of water-gas two-phase displacement process in unsaturated granite residual soil

CAI Peichen, QUE Yun, LI Xian

(School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: Infiltration of current in unsaturated soil is essentially a two-phase flow problem of water displacing air in the process of infiltration. The accuracy of traditional two-phase flow research methods cannot meet the needs of engineering, and it is not conducive to repetitive research. In contrast, the numerical simulation method of multiphase flow at the meso-scale can better simulate the whole dynamic process of water flooding. Mao Huan, Qren and others have achieved great results in the field of pore meso-scale research, but on the one hand, most of them focus on the study of rock multiphase flow, and there are some differences between the research object and the actual pore structure. On the other hand, the widely used pore network model method cannot directly show the change of particle velocity at any time and cannot present the phase interface movement state. In view of this, in order to reveal the dynamic percolation mechanism of water-gas two-phase displacement of unsaturated granite residual soil, this paper selected undisturbed granite residual soil in Fuzhou as the research object and studied the dynamic characteristics of two-phase displacement of undisturbed soil samples by using industrial CT scanning images and Level Set method. The results show that the Level Set method can properly capture the interface position between two immiscible fluids for meso-scale water-gas two-phase displacement simulation. The water-gas two-phase displacement process has the characteristics of large pore preferential flow, and the 'low around'

收稿日期: 2020-10-12; 修订日期: 2021-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41772297); 福建省自然科学基金项目 (2018J01771)

第一作者: 蔡沛辰 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事细观尺度渗流研究工作。E-mail: peichen fut@qq.com

通讯作者: 阙云 (1980-), 男, 教授, 博士, 主要从事土壤渗流方面的研究和教学工作。E-mail: queyun 2001@fzu.edu.cn

phenomenon can easily appear in the higher ground of porosity roundness in general. The displacement rate is mainly controlled by the tortuosity of the channel, displacement speed is relatively high in the straight and wide channel. There is an obvious phenomenon of 'preferential passage', and its seepage time is positively correlated with the first rapid and then slow characteristics, and the maximum and minimum growth rate are 10.77 % and 1.90 %, respectively. The velocity distribution of the pore cross-section is related to the pore structure, and the phenomena of 'reflux' and 'flow around' cause the displacement velocity to drop sharply, whose decreasing degree can reach 21.62 %. The maximum displacement resistance appears at the hole wall, and the narrower the hole, the greater the resistance. The displacement efficiency is directly proportional to the displacement pressure difference, and the initial pressure growth effect is significant (up to 25.49 %, and only 1.47 % later). The research results can provide a theoretical basis for the study of the water migration mechanism of porous slopes, and also can enrich the theoretical basis of rainfall-induced landslides and are helpful in preventing natural disasters.

Keywords: unsaturated granite; residual soil; CT scan slice; porous media; Level Set; water-gas two-phase displacement

非饱和土广泛存在于自然界中[1]。与饱和土不同,非饱和土是一种三相土,固相(土体基质)、液相(水溶液)和气相(空气)同时存在。事实上,水流在非饱和土体中的人渗过程实质上是水在下渗过程中驱替空气的两相流问题。孔隙细观尺度下的两相流研究具有十分广泛的工程背景,石油开采、废弃物处理、地下水有机污染及泄水建筑中的掺气水流等都与细观多相渗流机理有着密切的联系[2-4]。传统的两相流研究多采用试验方法,如玻璃刻蚀、薄片平面驱替等二维方法^[5],岩心驱替物理试验、宏观驱替 CT 扫描等三维方法^[6-7],但试验方法研究成本较高,操作较繁琐困难,且精度一般无法满足工程需要,更不利于开展重复性研究。因此,为克服试验方法的不足,细观尺度下的数值模拟方法得到了迅速发展和应用。

数值模拟方法利用计算机刻画细观孔隙结构,模 拟水驱气的整个动态过程,具有重复、方便和可视化 等优点。目前,细观尺度下多相流的数值模拟方法主 要包括:格子 Boltzmann、孔隙网络模型、相场等方 法。如: 毛欢^[8] 基于格子 Boltzmann 方法, 利用 Shan-Chen 模型在孔隙尺度上对两相不混溶驱替过程进行 了模拟; Oren 等^[9] 基于孔隙网络模型方法, 通过构建 大量砂岩孔隙网络模型,进行了多相渗流模拟,并通 过模拟结果预测了多相流的相对渗透率;陈民锋等[10] 建立油水两相三维孔隙网络模型,模拟了储层岩心的 初次油驱和二次水驱过程;朱光谱等[11]基于相场方 法,对孔隙尺度下表面活性剂两相流进行了模拟研 究。上述相关研究已取得丰硕成果,但多集中于岩石 多相流的研究,且研究对象与实际孔隙结构存在一定 差异;应用较广泛的孔隙网络模型方法无法直观展现 任一时刻各质点流速变化情况及无法呈现相界面移

动状态。Level Set 方法最早由 Osher 等^[12] 提出,现已用于两相流的数值模拟领域^[13-15],但受限于孔隙结构理想化或油气/水两相驱替,且未涉及土体细观孔隙内的水驱气两相模拟。鉴于此,本文选用花岗岩残积土作为研究对象,对其进行工业 CT 扫描,建立二维细观孔隙模型,借助 COMSOL Multiphyscis 有限元软件,采用 Level Set 方法进行数值模拟,刻画土壤内部各孔隙区域水-气两相驱替的动态可视化过程,并分析驱替过程中的驱替速度、阻力及效率的规律。

1 CT 扫描及细观模型构建

1.1 CT 扫描及图像处理

试验原状土选自福州市某地山坡,现场取样如图1所示。为保证取样过程尽量不破坏原状土孔隙结构,首先将取样位置周围土壤挖出,保留核心土,之后将中间预留的土体上部削成与模型盒相当的大小,再将模型盒慢慢向下压入,依次重复削压,直至土体到达模型盒底后再向下超削约5cm深度,以便将土柱从根部切断,最终获取尺寸为15cm×15cm×40cm的土柱试样。

为保证原状土体孔隙 CT 扫描图像的真实性,对 其进行如下处理:首先,将获取的土柱试样用保鲜防 水材料封装,防止土体内部水分过分蒸发;其次,将封 装后的试样放置于定制的木质模板箱中,防止搬运途 中的扰动对其孔隙结构造成较大影响;最后,运至实 验室后,拆除模板和封装材料,进行工业 CT 扫描试验。

CT 扫描试验设备为 C450KV 高能量工业 CT, 工作电压为 450 kV, 电流为 63 mA, 扫描最低分辨率为 0.15 mm。对获取的图像, 通过 Image J 中的 Threshold 功能进行二值化处理, 形成只包含黑白两色的图像,

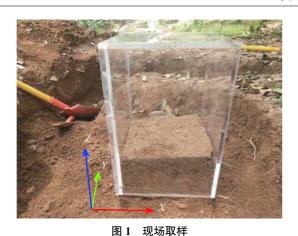


Fig. 1 Field sampling

再利用中值滤波对其进行降噪,除去图像中孤立的噪点,最终得到一系列 15 mm×15 mm的二维扫描切片(图 2)。考虑到计算时间的因素,从原始图像中选取孔隙连通性较好的一部分区域作为模拟对象,并将其等分为 4 部分,局部放大如图 3 所示,模型 a—d尺寸均为 3.0 mm×1.6 mm。

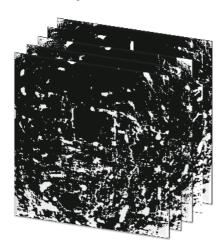


图 2 二维扫描切片 Fig. 2 2D scanning slice

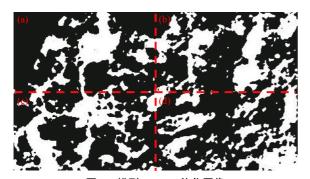


图 3 模型 a—d 二值化图像 Fig. 3 Model a—d binarized image

1.2 计算几何模型

基于上述步骤,类似处理其他图像以获得不同孔

隙几何模型。最后,将这些图像以数组的形式存储在 MATLAB 中,借助 COMSOL-MATLAB 接口^[16] 将它们 转换为计算域,并作为计算几何模型导入 COMSOL 中进行仿真模拟。以图 3 中模型 b 为例,构建的计算几何模型如图 4(a)所示。此外,为清楚查看网格剖分质量分布情况,将图 4(a)中红色圈出部位放大,得到图 4(b),可以看出:模型 b 的网格质量大多处于 0.8 左右,质量分布较为均匀,也为后续数值模拟结果的精确度奠定了基础。

2 水-气两相驱替仿真模拟

2.1 控制方程

2.1.1 纳维尔·斯托克斯方程

采用不可压缩的纳维尔·斯托克斯(N-S)方程描述流体流动[17], 控制方程如下:

$$\begin{cases} \rho(\boldsymbol{u} \cdot \nabla)\boldsymbol{u} = \nabla \cdot \left[-p\boldsymbol{I} + \mu \left(\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^T \right) \right] + \rho g + \boldsymbol{F} \\ \rho \nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \end{cases}$$
(1)

式中: ρ ——流体密度/ $(kg \cdot m^{-3});$

u—-流速/(m·s⁻¹);

p——压力/Pa;

I---单位矩阵:

u──流体动力黏度/(Pa·s):

F——体积力/(N·m⁻³):

g——重力加速度/(m·s⁻²)。

2.1.2 界面张力

界面张力 F_{st} 由下式定义:

$$\mathbf{F}_{\rm st} = \nabla \cdot \mathbf{T} \tag{2}$$

$$T = \sigma \left\{ I + (-nn^T) \right\} \delta \tag{3}$$

$$n = \frac{\nabla \Phi}{|\nabla \Phi|} \tag{4}$$

$$\delta = 6|\Phi(1 - \Phi)||\nabla\Phi| \tag{5}$$

式中: σ —表面张力系数;

n——界面单位法向量:

 δ —— 狄拉克函数;

Φ——水-气两相界面等值线。

2.1.3 Level Set 方法

"Level Set"接口通过跟踪水平集函数的等值线来确定流体界面,等值线 $\phi = 0.5$ 决定界面的位置。控制 ϕ 的传递和重新初始化的方程为:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla \Phi = \gamma \nabla \cdot \left(\varepsilon \nabla \Phi - \Phi (1 - \Phi) \frac{\nabla \Phi}{|\nabla \Phi|} \right) \tag{6}$$

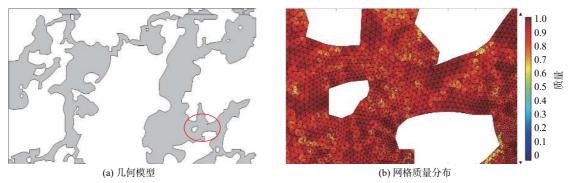


图 4 模型 b 的计算几何模型及网格质量分布图

Fig. 4 Computational geometric model and mesh quality distribution map of model b

式中: γ ——重新初始化参数/($m \cdot s^{-1}$);

 ε ——界面厚度控制参数/m。

由于水平集函数是一个平滑阶跃函数,因此可通过下式确定全局密度和动力黏度:

$$\rho = \rho_{w} + (\rho_{g} - \rho_{w})\Phi$$

$$\mu = \mu_{w} + (\mu_{g} - \mu_{w})\Phi$$
(7)

式中: $\rho_{\rm w}$ —水相密度/(kg·m⁻³);

 $\mu_{\rm w}$ —水相动力黏度/(Pa·s);

 ρ_{g} 一气相密度/(kg·m⁻³);

 $\mu_{\mathfrak{g}}$ 一气相动力黏度/(Pa·s)。

2.2 材料属性

采用水作为驱替相,空气作为被驱替相,具体材料属性见表1,其中界面张力的设定见文献[18]。

表 1 材料属性
Table 1 Material properties

类别	界面张力/(N·m ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)	动力黏度/(Pa·s)
水相	4.80×10 ⁻²	1 000	1.01×10 ⁻³
气相	4.80×10 ⁻²	1.209	1.79×10 ⁻⁵

2.3 边界及初始条件

水-气两相驱替模拟中,依据构建的几何模型,进行边界条件设定:上下边界为进出口,左右边界为不透水层,壁为无滑移条件,初始界面设置为 t=0 时刻水相和气相的接触面。以模型 b 为例 (图 5),其他模型的设定与模型 b 类似。其中, P_{in} 为人口水压, P_{out} 为出口水压。

3 结果与讨论

3.1 数值模型验证

为验证文中数值模型的正确性,采用体积守恒方法^[19]验证几何模型中水-气两相驱替结果是否正确。由于多孔介质孔隙区域体积一定,故每一时刻气相与水相的总体积是恒定不变的。对于二维多孔介质孔

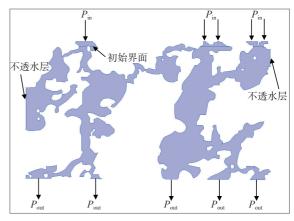


图 5 边界条件设定

Fig. 5 Boundary condition setting

隙模型而言,应采用孔隙区域面积来验证,即每一时刻气相与水相所占的孔隙面积是恒定不变的,模型 a-d 孔隙总面积依次为 8.56×10^{-7} , 1.83×10^{-6} , 1.75×10^{-6} , 8.87×10^{-7} m^2 。

t=0时刻,气相存在于初始界面以下区域,水相存在于初始界面以上区域。水相从上边界进入孔隙区域,以初始界面为界限,通过水压力驱替气相,到下边界流出,并在孔隙区域内保持恒定的水压差。其中,考虑到运算效率及后期驱替可观察度等因素,以入口水压 1.1 kPa、出口水压 0.1 kPa 为例进行驱替运算仿真。图 6 为模型 a—d 水相、气相占孔隙区域面积随时间变化的曲线。从图中可以观察到: 4 个模型中,水-气两相在孔隙区域中的面积之和恒定不变,且都等于各自模型的孔隙总面积,符合守恒定律,也验证了该数值模型的正确性。

3.2 水-气两相驱替

3.2.1 动态驱替过程分析

采用 Level Set 方法模拟不同时刻水驱气的动态可视化过程,图 7 为模型 a一d 不同时刻下水-气两相驱替过程示意图,其中绿色为气相,蓝色为液相。

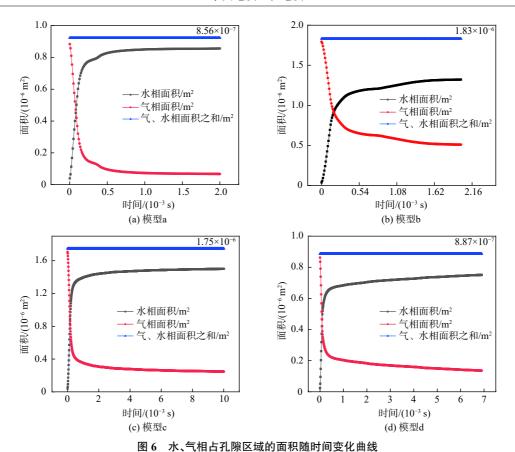


Fig. 6 The area curve of water and gas in the pore area with time

从图 7(a)可以发现:流体会优先选择较大孔隙进行驱替,之后才会选择较窄孔隙,且在成圆度较高的孔隙处易出现"绕流"现象。计算知此处成圆度高达0.83,成圆度表征孔隙形状趋近于圆的程度,定义为:4π倍的孔隙面积与孔隙周长平方的比值^[20]。由图 7(b)可看出:驱替流体存在"回流"现象,且部分死角孔隙流体不能进入,其原因为两种流体均不可压缩且不相溶,水相驱替使其形成了只含有空气的封闭空间。由图 7(c)可知:笔直且较大的孔道,驱替速度相对较高,如通道 1 明显快于 2 和 3。再结合图 7(d)可见:在孔道相互交错区域,流体并不直接相融合,而是经过一段时间后才汇合。

综上,对于细观尺度水-气两相驱替模拟,Level Set 方法能很好地捕捉两种不混溶流体之间的界面位置。水-气两相驱替过程存在大孔隙优先流特征,且"绕流"现象一般易于出现在孔隙成圆度较高处。受水-气相参数限制,部分死角孔隙形成了只含气相的封闭空间。笔直且较宽的孔道,驱替速度相对较高,孔道相互交错区域,多条流体需经过一段时间后才能融合。

3.2.2 驱替速度可视化分析

运用后处理模块中的速度可视化功能,以模型

b 为例, 绘制不同时刻水-气两相驱替过程速度可视化图 (图 8)。可以看出: 多孔介质模型众多孔隙中仅存在少数组成的主要渗流通道, 且主要通道普遍有着孔隙半径大、孔道笔直的特征。由各不同时刻速度分布云图可知, 流速较大处多出现在孔道相对较窄或相交汇处, 且在驱替压差不变的条件下为 5×10⁻⁴, 1×10⁻³, 1.5×10⁻³, 2×10⁻³ s 时, 最大流速分别为 0.878, 0.984, 1.03, 1.05 m/s, 即随驱替时间延长, 流速有逐渐增大趋势。上述现象表明: 水-气两相驱替速度受孔道迂回程度控制, 且流体优先选择主要通道进行渗流, 存在明显的"优势通道"。驱替速度与驱替时间以先快后缓的特征呈正相关变化, 最大增长率为 10.77%, 最小仅为 1.90%。

图 9 为不同孔道横截面速度分布图,其中孔道 a、b 位置如图 7(b)所标注。从图中可以看出:孔道 b 中速度最大位置出现在中心位置 x=3.745 mm 处,而孔道 a 中速度最大位置在 4.815 mm 处,并不在中心位置 4.775 mm,存在右偏现象,与前人研究结果有所不同^[13]。分析原因是:孔道 a 所处位置的上方流体流入的方向为右上到左下,相比孔道 b,流体会偏向孔道右侧通过。此外,由图 9(a)可知驱替持续时间越长,驱替速度越大,与图 8 相对应,但孔道 b 流速最大出现在

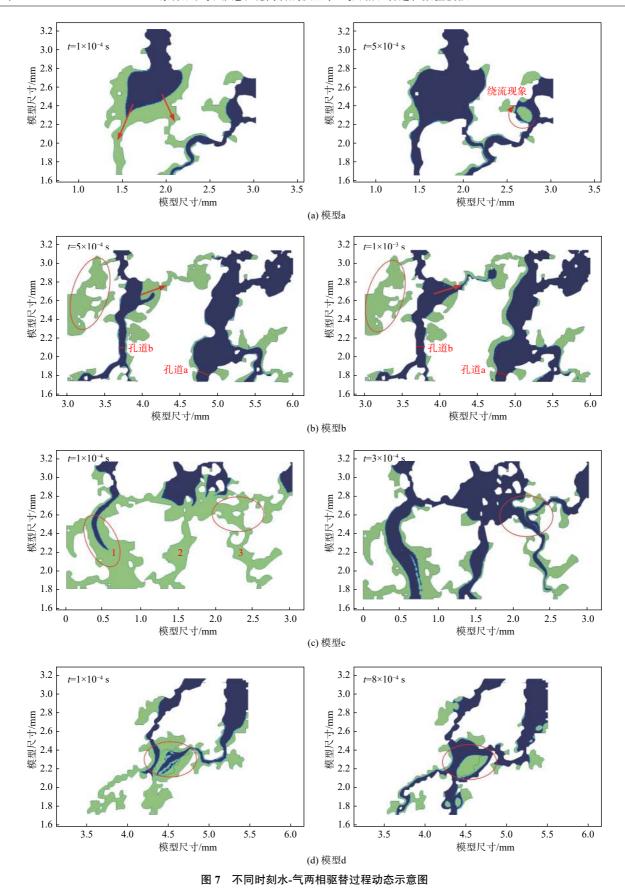


Fig. 7 Dynamic schematic diagram of the water-gas two-phase displacement process at different times

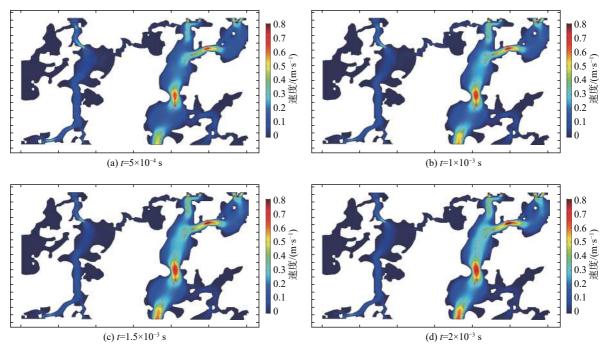


图 8 不同时刻水-气两相驱替过程速度可视化图

Fig. 8 Visualized diagram of water-gas two-phase displacement process speed at different times

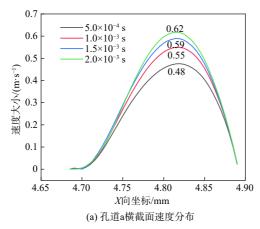
 5×10^{-4} s 处,到 1×10^{-3} s时流速反而有所降低,不符合前文所得结论。原因分析如下:孔道 b 在 1×10^{-3} s 时,出现了"回流"现象,如图 7(b)所示,使得通过孔道 b 的流量骤降,进而使其速度减小,降低幅度为 21.62%。

3.2.3 驱替阻力场分析

图 10 描述了不同时刻水-气两相驱替阻力分布情况。可以发现:驱替阻力随驱替时间的延长而增加,且越靠近孔壁区域,红色程度越大,尤其是狭窄区域,表明驱替阻力最大出现在孔壁处,且孔道越窄,阻力越大。

3.2.4 驱替效率分析

水-气两相驱替效率 E_t 定义为: t 时刻下, 孔隙区域内水相饱和度与水-气两相饱和度的比值。



$$E_t = \frac{S_{wt}}{S_{wt} + S_{gt}} \tag{8}$$

式中: S_{wt} —t 时刻水相饱和度;

 S_{ot} —t 时刻气相饱和度。

为探究不同驱替压差对驱替过程的效率影响情况,以 0.1 kPa 为初始驱替压差,分三阶段加压,每阶段加压 0.3 kPa,进行驱替模拟,并得结果如图 11(a)所示。从图中可以发现: 0.1~0.4 kPa、0.4~0.7 kPa、0.7~1.0 kPa 驱替效率分别增加了 25.49%、6.25% 和 1.47%,说明驱替效率随驱替压差的增大而增大,且第一阶段加压增速效果更加显著。

图 11(b)为相同驱替压差 1 kPa 下不同孔隙结构

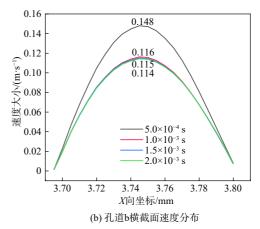


图 9 不同孔道横截面速度分布图

Fig. 9 Velocity distribution diagram of different tunnel cross sections

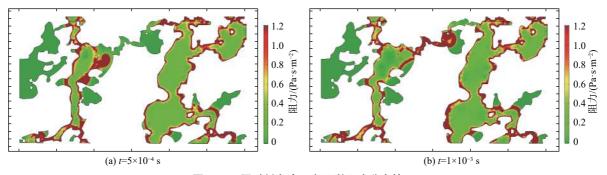


图 10 不同时刻水-气两相驱替阻力分布情况

Fig. 10 Resistance distribution of water-gas two-phase displacement at different times

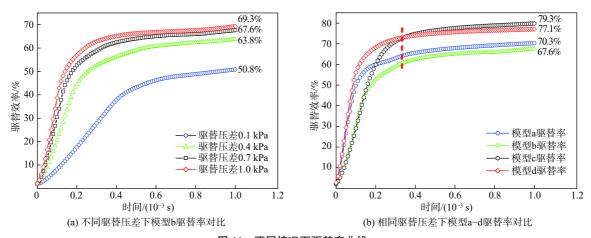


图 11 不同情况下驱替率曲线

Fig. 11 Displacement rate curve under different conditions

模型驱替效率的对比曲线。计算可知,模型 a—d 孔隙率分别为 26.59%、38.14%、36.43% 和 18.48%。由图可知: 初期, 孔隙率最小的模型 d, 驱替效率最为显著; 之后,模型 c 急剧上升, 而模型 a、b、d 增速明显减缓。结合图 7 分析原因: 模型 c 虽孔隙率较大, 但孔隙结构并不复杂, 其孔隙均质性较好, 无明显狭窄、不连通的孔隙。除此之外, 根据文献 [21] 可知, 驱替效率还受到孔隙结构形态、孔径、连通率等因素影响。

上述分析表明:驱替效率与驱替压差成正比关系,且初期加压增速效果显著,可达25.49%,而后期仅

为 1.47%。驱替初期, 相比孔隙率大的模型而言, 孔隙 较小模型的驱替效率较大, 而随驱替时间持续, 驱替 效率还将受孔隙结构特征的影响。

3.3 与其他学者两相驱替结果对比

表 2 列出了本文与其他学者对两相流驱替研究结果的对比。从表 2 可以得出:

- (1)目前学者对两相流的研究多集中于岩石领域,少有提及土体的两相驱替研究。
- (2)岩石类的驱替过程一般都可得出优势流和指近现象,而本文还发现其存在"回流"和"绕流"现象。

表 2 两相流驱替研究结果对比

Table 2 Comparison of research results of two-phase flow displacement

类别	学者	吴丰等[22]	冯其红等 ^[21]	高亚军等 ^[14]	张鹏伟等 ^[23]	本文
	对象	岩石	砂岩	岩石	孔隙模型	花岗岩残积土
	类型	气驱水	水驱油	水驱油	气驱水	水驱气
驱替可补	观化过程	微观指进	非平行推进	微观指进	优势渗流	回流、绕流
驱替	速度	越靠近孔壁流速越小	速度越大采出程度越高	孔道中心流速最大, 壁面流速最小	-	孔道中心流速并非最大, 回流使流速骤降
驱替	阻力	出口见气后,阻力减小	-	-	-	孔道越窄,阻力越大, 最大值出现在孔壁
驱替	效率	出口见气后效率不变	受孔喉、驱替速度、 流体影响	-	-	与压差成正比, 初期加压增速显著

- (3)前人对驱替速度的研究多集中于速度大小分布上,本文除上述研究,还研究了孔道位置与速度的关系,得出孔道中心流速受孔隙结构影响,并非一直最大,且"回流"和"绕流"现象会使流速骤降。
- (4)驱替阻力和驱替效率前人研究较少,提及的都只限于分析,而未做深入研究,本文一方面通过分析水-气两相驱替阻力场分布情况,得到驱替阻力最大出现在孔壁处,孔道越窄,阻力越大;另一方面,研究了压差、孔隙结构与驱替效率的关系,得出驱替效率与压差成正比,且初期加压效果显著。

4 结论

- (1)水-气两相驱替过程存在大孔隙优先流特征, 且"绕流"现象一般易于出现在孔隙成圆度较高部 位。受水-气相参数限制,部分死角孔隙形成了只含气 相的封闭空间。
- (2)驱替速度主要受孔道迂回程度控制,笔直、较宽孔道,驱替速度相对较高,存在明显的"优势通道",且与时间以先急后缓的特征呈正相关变化,最大增速率为10.77%,最小仅为1.90%。孔道横截面速度大小分布与孔隙结构有关,"回流"和"绕流"现象会使驱替速度骤降,降低幅度可达21.62%。
- (3)驱替阻力随驱替时间的延长而增加,且最大出现在孔壁处,孔道越窄,阻力越大。
- (4)驱替效率与驱替压差成正比关系,初期加压增速效果显著,可达25.49%,后期仅为1.47%。驱替初期,相比孔隙率大的模型而言,孔隙较小模型的驱替效率较大,而随驱替时间持续,驱替效率还将受孔隙结构特征的影响。
- (5)天然情况下,水-气两相驱替过程中的驱替效率不仅受土体孔隙率的影响,还受孔隙连通率、孔喉大小等定量化参数的影响,而本文只涉及到不同模型间的孔隙率与驱替效率的关系。未来将基于编程法在非饱和土体中提取各种孔隙结构参数,进行定量化表征,并综合、多因素考虑其与驱替效率之间的关系。

参考文献 (References):

- [1] 陈嘉伟, 高游, 付俊杰, 等. 不同类型黏土的强度特性及其预测[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 101—106. [CHEN Jiawei, GAO You, FU Junjie, et al. Strength of different clayey soils and its prediction[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 101—106. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 郑晓磊,刘志峰,王晓宏,等.二维非均匀多孔介质中

- 不可压两相驱替的有限分析算法 [J]. 计算物理, 2015, 32(5): 586 594. [ZHENG Xiaolei, LIU Zhifeng, WANG Xiaohong, et al. Finite analytic numerical method for two-Phase incompressible flow in 2D teterogeneous porous media [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2015, 32(5): 586 594. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 乔文静, 叶淑君, 吴吉春. 非均质孔隙介质中两相流的 光透法应用研究 [J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(2): 112 119. [QIAO Wenjing, YE Shujun, WU Jichun. A study of the two-phase flow in heterogeneous porous media with the light transmission method [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(2): 112-119. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 乔梁. 泄洪洞突扩突跌掺气水流特性的数值模拟研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014. [QIAO Liang. Numerical simulation study on aerated water flow characteristics of sudden expansion and sudden fall of spillway tunnel[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 于明旭,朱维耀,宋洪庆. 低渗透储层可视化微观渗流模型研制[J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2013, 32(12): 1646 1650. [YU Mingxu, ZHU Weiyao, SONG Hongqing. Development of microscopic visualization flow model of low-permeability reservoir[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2013, 32(12): 1646 1650. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 王伟, 赵永攀, 江绍静, 等. 鄂尔多斯盆地特低渗油藏 CO₂非混相驱实验研究[J]. 西安石油大学学报(自然 科学版), 2017, 32(6): 87 92. [WANG Wei, ZHAO Yongpan, JIANG Shaojing, et al. Experimental study on CO₂ immiscible flooding in ultra-low permeability reservoirs, Ordos Basin[J]. Journal of Xi 'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2017, 32(6): 87 92. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 吕伟峰,冷振鹏,张祖波,等.应用CT扫描技术研究低渗透岩心水驱油机理[J].油气地质与采收率,2013,20(2):87 90. [LYU Weifeng, LENG Zhenpeng, ZHANG Zubo, et al. Study on waterflooding mechanism in low-permeability cores using CT scan technology[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(2):87 90. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 毛欢. 基于格子Boltzmann方法的多孔介质内两相流流动特性的研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2017. [MAO Huan. Study on characteristics of two-phase flow in porous media with Lattice Boltzmann method[D]. Dongying: China University of Petroleum

- (Huadong), 2017. (in Chinese with English abstract)
- [9] ØREN P E, BAKKE S. Process based reconstruction of sandstones and prediction of transport properties[J]. Transport in Porous Media, 2002, 46(2/3): 311 343.
- [10] 陈民锋,姜汉桥.基于孔隙网络模型的微观水驱油驱替特征变化规律研究[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2006,28(5): 91 95. [CHEN Minfeng, JIANG Hanqiao. Law of characteristic variations of microscopic water displacement based on pore network model[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006,28(5): 91 95. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 朱光普, 姚军. 基于相场模型的表面活性剂两相流动模拟研究[C] //中国力学学会. 第十届全国流体力学学术会议论文摘要集. 杭州: 中国力学学会, 2018: 212-212. [ZHU Guangpu, YAO Jun. Research on two-phase flow simulation of surfactant based on phase field model[C] // Chinese Society of Mechanics. Collection of abstracts of the 10th National Conference on fluid mechanics. Hangzhou: Chinese Society of Mechanics, 2018: 212-212. (in Chinese)]
- [12] OSHER S, SETHIAN J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations [J]. Journal of Computational Physics, 1988, 79(1): 12 49.
- E 琳琳, 田辉, 李国君. 基于Level Set方法对油水和气水两相界面的数值模拟[J]. 应用力学学报, 2010, 27(2): 298 302. [WANG Linlin, TIAN Hui, LI Guojun. Numerical simulation of oil-water and air-water two-phase flow based on level set methods[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(2): 298 302. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 高亚军,姜汉桥,王硕亮,等.基于Level Set有限元方法的微观水驱油数值模拟[J].石油地质与工程,2016,30(5):91-96. [GAO Yajun, JIANG Hanqiao, WANG Shuoliang, et al. Numerical simulation of microscopic water-oil displacement based on level set finite element method[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2016, 30(5):91-96. (in Chinese with English abstract)]
- [15] LIU J J, SONG R. Investigation of water and CO₂ flooding using pore-scale reconstructed model based on micro-CT images of Berea sandstone core[J]. Progress in Computational Fluid Dynamics, 2015, 15(5): 317 326.
- [16] 赵晓磊, 齐秋菊, 郭春超. COMSOL与MATLAB联合仿真的实现方法[J]. 中国新技术新产品, 2014(24): 17-19. [ZHAO Xiaolei, QI Qiuju, GUO Chunchao. The realization method of COMSOL and MATLAB cosimulation[J]. New Technology & New Products of China, 2014(24): 17 19. (in Chinese with English

abstract)]

- [17] GUNDE A C, BERA B, MITRA S K. Investigation of water and CO₂ (carbon dioxide) flooding using micro-CT (micro-computed tomography) images of Berea sandstone core using finite element simulations[J]. Energy, 2010, 35(12): 5209 5216.
- [18] 杨永飞, 尹振, 姚军, 等. 多孔介质中水气交替注人微观渗流模拟[J]. 地球科学, 2013, 38(4): 853 858. [YANG Yongfei, YI Zhen, YAO Jun, et al. Pore-scale simulation of microcosmic flow during water-alternatinggas (WAG) in porous media[J]. Earth Science, 2013, 38(4): 853 858. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 张石峰, 张冀生, 于炯. 两相流模型数值解[J]. 新疆工学院学报, 1996, 17(1): 45 51. [ZHANG Shifeng, ZHANG Jisheng, YU Jiong. Numerical solution of two-phase flow model[J]. Journal of Xinjiang Institute of Technology, 1996, 17(1): 45 51. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 张丽萍, 陈儒章, 邬燕虹, 等. 风化花岗岩坡地土壤剖面大孔隙特性的空间分布[J]. 土壤学报, 2018, 55(3): 620 632. [ZHANG Liping, CHEN Ruzhang, WU Yanhong, et al. Spatial distribution of macro-pore properties in soil profile on a slope of weathering granite[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(3): 620 632. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 冯其红, 赵蕴昌, 王森, 等. 基于相场方法的孔隙尺度油水两相流体流动模拟[J]. 计算物理, 2020, 37(4): 439 447. [FENG Qihong, ZHANG Yunchang, WANG Sen, et al. Pore-scale oil-water two-phase flow simulation based on phase pield method[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2020, 37(4): 439 447. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 吴丰, 姚聪, 丛林林, 等. 岩石气水两相渗流的玻璃刻蚀驱替实验与有限元数值模拟对比[J]. 岩性油气藏, 2019, 31(4): 121 132. [WU Feng, YAO Cong, CONG Linlin, et al. Comparison of glass etching displacement experiment and finite element numerical simulation for gas-water two-phase seepage in rocks[J]. Lithologic Reservoirs, 2019, 31(4): 121 132. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 张鹏伟, 胡黎明, MEEGODA Jay, 等. 基于岩土介质三维孔隙结构的两相流模型[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 37 45. [ZHANG Pengwei, HU Liming, MEEGODA Jay, et al. Two-phase flow model based on 3D pore structure of geomaterials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(1): 37 45. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华