

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.108



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



多孔介质中角膜-液桥流对毛管压力曲线的影响

王冠雄, 胡冉, 兰天, 陈益峰

(武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室; 水工岩石力学教育部重点实验室, 武汉 430072)

摘要:毛管压力曲线是模拟孔隙介质非饱和渗流或水-气多相渗流过程的重要本构关系。当湿润相饱和度趋近残余饱和度时, 固相颗粒之间形成的角膜和液桥是流体进行驱排过程的主要方式, 目前, 有关角膜和液桥对毛管压力曲线的影响机制研究还不够深入。搭建微流控可视化实验平台, 在 6 组不同孔隙结构和粗糙度的微流体中开展准静态排水实验, 通过试验观察角膜-液桥流, 并量化这一现象对毛管压力曲线的影响。结果表明: 角膜-液桥流主要出现在饱和度较低的情况下, 并会导致湿润相的残余饱和度降低 0.21~0.32; 角膜-液桥流的出现与孔隙介质的湿润性密切相关, 粗糙的固相表面会降低湿润相的接触角, 使角膜-液桥流更容易出现; 角膜-液桥流的影响与液桥的数量正相关, 随着孔隙率和非均质性的减小, 角膜-液桥流的作用变得显著。

关键词: 多孔介质; 毛管压力曲线; 微流控实验; 角膜; 液桥

中图分类号: TU456 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)01-0044-10

Effects of corner-bridge flow on capillary pressure-saturation curve in porous media

WANG Guanxiong, HU Ran, LAN Tian, CHEN Yifeng

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science; Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering of the Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China)

Abstract: The capillary pressure curve is a fundamental constitutive relationship for simulating unsaturated flow and water-gas multiphase flow in porous media. As the wetting-phase saturation approaches the residual saturation, corner films and liquid bridges formed between solid grains become the dominant pathways governing fluid displacement processes. At present, the mechanisms by which corner films and liquid bridges influence capillary pressure curves remain insufficiently understood. In this study, a microfluidic visualization experimental platform was developed, and quasi-static drainage experiments were conducted in six sets of microfluidic models with different pore structures and surface roughness. The corner film-liquid bridge flow was directly observed, and its influence on capillary pressure curves was quantitatively evaluated. The results indicate that corner film-liquid bridge flow mainly occurs at low wetting-phase saturations and leads to a reduction in the residual wetting-phase saturation by 0.21-0.32. The occurrence of corner film-liquid bridge flow is closely related to the wettability of the porous medium; rough solid surfaces reduce the contact angle of the

收稿日期: 2023-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(52122905, 51988101, 51925906)

作者简介: 王冠雄(1998-), 男, 主要从事孔隙介质多相渗流研究, E-mail: runle1@whu.edu.cn。

胡冉(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: whuran@whu.edu.cn。

Received: 2023-08-13

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52122905, 51988101, 51925906)

Author brief: WANG Guanxiong (1998-), main research interest: multiphase flow in porous media, E-mail: runle1@whu.edu.cn.

HU Ran (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: whuran@whu.edu.cn.

wetting phase, thereby facilitating the formation of corner films and liquid bridges. Moreover, the impact of corner film-liquid bridges is positively correlated with the number of liquid bridges, and their effect becomes more pronounced with decreasing porosity and heterogeneity of the porous medium.

Keywords: porous media; capillary pressure-saturation curve; microfluidic experiment; corner film; liquid bridge

毛管压力曲线 (capillary pressure-saturation curve, 也称土-水特征曲线或者土壤水分曲线), 是描述土壤、岩石等多孔介质中湿润相饱和度与毛细压力之间的关系曲线^[1-4], 是预测多相渗流相对渗透率^[5-6]和介质抗剪强度^[7-8]的基础。因此, 该曲线是模拟孔隙介质非饱和渗流或水-气多相渗流过程的重要本构关系。深入研究毛管压力曲线对于降雨滑坡灾害防治^[9-10]、强化油气开采^[11]、核废料处置^[12]、二氧化碳地质封存^[13-14]等工程实践具有重要意义。

多孔介质特性 (如孔隙分布特征^[15-17]、湿润性^[18-20]、连通性^[21-23]) 和流动过程^[24-26]是影响毛管压力曲线的重要因素。针对介质特性, 学者们开展了大量研究工作。桑进等^[16]通过试验测量了全吸力范围内固化土的排水毛管压力曲线, 发现更均匀的孔隙分布和更小的孔隙率提高了全吸力范围的饱和度, 增大了减湿段的毛管压力, 减小了减湿速率。伏映鹏等^[17]建立的考虑颗粒级配的毛管压力曲线理论模型表明, 更均匀的孔隙分布能增大高吸力阶段的饱和度, 而不影响中低吸力阶段的饱和度; 孔隙率增大, 全吸力范围饱和度和均增大。Wang等^[19]开展了不同介质中空气或超临界 CO₂ 驱替卤水的试验, 研究介质湿润性对毛管压力曲线的影响, 发现随着入侵相流体的接触角降低, 入侵相流体更容易填充整个孔隙介质。Moura等^[24]在单层玻璃珠介质中开展可视化排水试验和数值模拟, 研究了孔隙介质尺寸对毛管压力曲线的影响, 结果表明, 当孔隙介质的长宽比小于 5 时, 湿润相残余饱和度会随着孔隙介质的长宽比的增大而增大。

在流动条件的影响机制方面, 以往研究主要针对流体的连通性。随着排水过程的进行, 部分湿润相团簇被包裹在非湿润相中 (渗吸过程中则是非湿润相被湿润相包裹), 这种现象被称为毛细捕获^[18, 27]。如果湿润性满足一定条件, 残留的湿润相还会以薄膜的形式存在于固相周围^[28-29]。Golmohammadi等^[21]、Moura等^[22]通过试验发现, 被毛细捕获的湿润相团簇可以通过固相周围连通的薄膜被排出。Or等^[23]的研究表明, 随着湿润相的饱和度降低, 通过薄膜的流动成为驱排过程的主要方式。除薄膜外, 液桥也是影响湿润相连通性的重要机制^[24], 然而有关薄膜和液桥如何影响毛管压力曲线的研究还不够深入。

在试验技术方面, 毛管压力曲线通常采用压力板法、饱和盐溶液法、蒸汽平衡法、渗析法和滤纸法^[30-35]等方法测量。这些方法能获得毛管压力和饱和度的关系, 但无法观察到驱替过程中两相流体的分布特征。在可视化试验技术中, CT扫描能对不透明介质成像^[36], 但成像速度极慢, 只适合研究单个静止状态。与之相比, 基于激光刻蚀技术制备的微流体芯片介质为透明硅胶或树脂, 可以采用高帧率显微镜或照相机直接实时观测毫米至微米尺度下的两相流动过程^[37]。此外, 微流体技术还具备以下优势: 1) 试样制备工艺简单, 通过光敏树脂翻刻模具即可制成微流体芯片, 能够实现对微流体芯片的低成本快速装配; 2) 试验耗时相对较短, 微流体芯片尺寸小, 两相流体达到平衡需要的时间短; 3) 可测量的毛管压力范围大, 在微流体芯片内设置小间隔格栅, 能测量的压力范围为进气压力至非湿润相不再增加的最终压力。

笔者基于自主搭建的微流体芯片可视化试验平台, 开展空气驱水的定压力准静态排水试验, 测定毛管压力-饱和度关系。通过可视化技术实现对排水过程中湿润相“角膜-液桥流”的细观观测和定量表征, 揭示固体表面粗糙度对角膜流的形成机制, 量化孔隙率和孔径变异性对液桥数量的影响, 阐明角膜-液桥流对毛管压力曲线的影响。

1 试验方法

1.1 可视化试验平台

为实现对多孔介质排水过程中毛管压力曲线的测定以及水气多相渗流的细观观测, 搭建如图 1(a)所示的微流体可视化试验平台。该平台主要由微流体芯片、图像采集装置和压力控制装置组成。设计了可升降的气密水箱, 并与微流体芯片连接。基于 U 型管原理, 通过改变水箱相对微流体芯片的高度 H (精度 1 mm, 范围 0~800 mm) 来精确控制微流体芯片内部气液两相压差, 即精确控制准静态条件下的毛管压力。为了实现多相渗流过程的细观观测, 在微流体芯片下方和上方分别安装蓝色面光源和高清相机 (Manta G-1236, AVT, 4 112 px × 3 008 px)。其中, 相机配备高清镜头 (AF-S Micro NIKKOR 40 mm f/2.8G, Nikon), 图像采集分辨率为 8.5 μm/px。

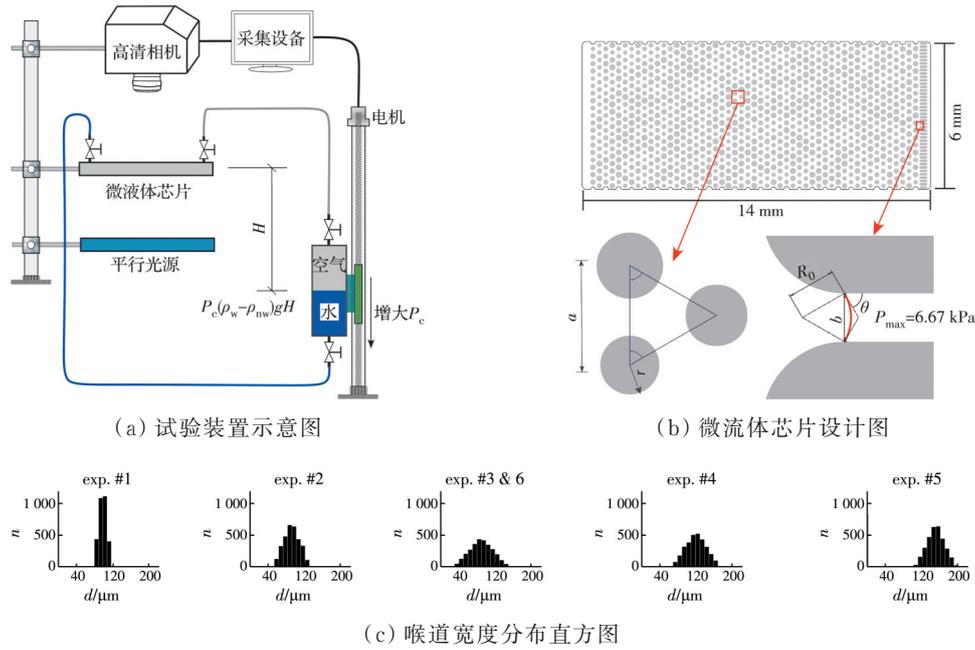


图 1 基于微流体芯片的多孔介质毛管压力曲线可视化试验系统

Fig. 1 Visualization experiment system for capillary pressure curve measurement in porous media based on microfluidic chips

1.2 微流控芯片设计与制备

为了研究不同孔隙结构下多孔介质的排水过程,探究孔隙结构对角膜-液桥流的影响机制,制备 5 种不同孔隙结构的微流体芯片。微流体芯片的几何结构设计如图 1(b)所示,模型长 14 mm、宽 6 mm、厚 40 μm。固体颗粒为不同半径的圆柱体,圆心位置按等边三角形排列,圆心间距 $a=300 \mu\text{m}$,圆柱半径服从均匀分布 $r_i \sim U[(1-\lambda)\bar{r}, (1+\lambda)\bar{r}]$,其中 λ 为结构非均质性系数。图 1(c)为 5 种不同孔隙结构的微流体芯片喉道宽度分布直方图,相应的几何参数如表 1 所示。需要指出的是,exp. #3 和 exp. #6 的微流体芯片几何结构相同,不同之处在于壁面是否粗糙。

表 1 微流体芯片的几何结构参数

Table1 Geometric structure parameters of the microfluidic chips

试验序号	λ	$\bar{r}/\mu\text{m}$	ϕ	壁面是否粗糙
exp. #1	0.1	105	0.54	是
exp. #2	0.2	105	0.54	是
exp. #3	0.3	105	0.54	是
exp. #4	0.3	90	0.66	是
exp. #5	0.3	75	0.76	是
exp. #6	0.3	105	0.54	否

在测定毛管压力曲线的试验过程中,为了保证流体的连通性得到满足(U型管原理),被驱替相(水)出口处应设置半透膜^[18],只允许湿润相(wetting phase)通过,阻挡非湿润相(non-wetting

phase)通过。为了实现该功能,在微流体芯片出口侧设置了条形格栅(如图 1(b)所示),液面在格栅处的最大毛管压力 P_{max} 可以由 Young-Laplace 方程得到。

$$P_{\text{max}} = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \sigma \left(\frac{2\cos\theta}{b} + \frac{2\cos\theta}{d} \right) \quad (1)$$

式中: R_1 为液面在平面内的曲率半径; R_2 为平面外(厚度方向)的曲率半径; b 为格栅间距; d 为微流体厚度; σ 为界面张力; θ 为湿润相静态接触角。格栅理论上能够在毛管压力小于 $P_{\text{max}}=6.67 \text{ kPa}$ 时阻碍非湿润相通过,使排水过程尽可能完整。

微流控芯片在微纳实验室和多相渗流实验室制备,制备流程如图 2 所示。第 1 步,制作光刻胶模具(图 2(a)):在洁净的硅片上旋涂一层厚度 40 μm 的光刻胶(Su8-2035)薄膜,经 65 °C 烘烤 3 min、95 °C 烘烤 6 min 后,在光刻机上紧贴掩模板进行 60 s 紫外曝光,再重复烘烤步骤。烘烤后在显影液中浸泡 5 min,未接受紫外曝光的光刻胶被软化,用异丙醇清洗掉软化的光刻胶,即得到具有微流体图案的光刻胶模具。在制备光刻胶模具过程中,使用刻蚀精度较低的菲林(胶片)掩模板和刻蚀精度很高的玻璃铬板掩模板,分别制作壁面粗糙和光滑的模具(单个颗粒的显微照片参见图 2(e))。第 2 步,制作 PDMS 硅胶模具(图 2(b)):将光刻胶模具置于培养皿中,称量 20 g PDMS 与 2 g 固化剂混合、搅拌,在真空箱中抽去气泡,浇注在培养皿中。将培养皿置于烘箱中,以 75 °C 烘烤 2 h,使 PDMS 固化,即可从

培养皿中取出PDMS模具。第3步,制作NOA81模具(图2(c)):使用等离子表面清洗机在负压环境下清洗PDMS模具40 s,目的是增加PDMS对NOA81的湿润性,以便在PDMS模具上滴涂厚约200 μm的NOA81薄膜,然后将模具置于紫外曝光箱中曝光30 s,使NOA81半固化,并用镊子小心揭下带有微流体图案的NOA81薄膜,用打孔器打出微流体入口和出口,得到NOA81模具。第4步(图2(d)):在载玻片上旋涂厚约200 μm的NOA81薄膜,置于紫外曝光箱中曝光30 s,使其半固化,然后将上一步获得的NOA81模具粘贴在载玻片上,再进行90 s紫外曝光,使其完全固化并牢固键合,得到最终使用的微流体芯片。

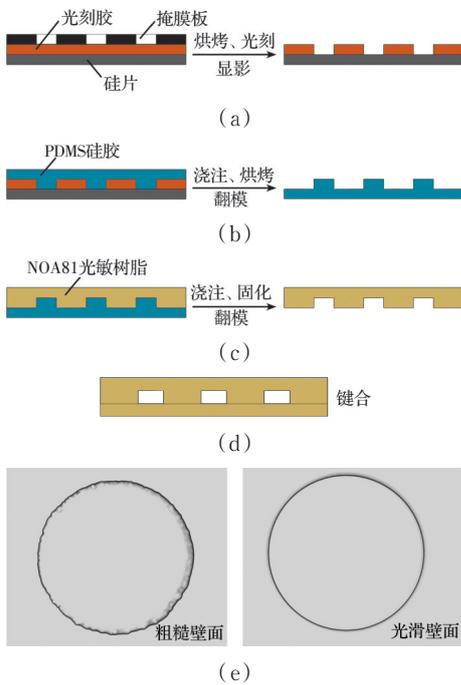


图 2 微流控芯片制备流程

Fig. 2 Microfluidic chip fabrication procedure

1.3 试验流程

采用染色的去离子水(胭脂红染料,质量分数0.2%,黏度 $\mu_w=890 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$)和空气(黏度 $\mu_{nw}=18.5 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$)分别作为湿润相和非湿润相,界面张力 $\sigma=67.0 \text{ mN/m}$,湿润相静态接触角 $\theta=48.4^\circ$ 。排水试验采用如下步骤:第1步,采用注射泵以 $100 \mu\text{L}/\text{min}$ 流量将微流体芯片注入去离子水,至完全饱和,然后将微流体芯片与水箱连接,调节水箱至微流体芯片相同高度。此时 $H=0$,毛管压力 $P_c=0$ (参见图1(a))。第2步,将整个试验系统静置1 h,以确保系统达到平衡状态。第3步,降低水箱高度2 mm(即增加毛管压力 19.6 Pa),此时芯片内水、气两相可能发生驱替,需要等待至两相界面稳定后(30 min不发生驱替),将水箱再次降低2 mm。重复上述过程,直至压力大于出口格栅最大毛管压力 P_{max} ,空气突

破出口,试验结束。试验期间不断进行图像采集(采集频率1 frame/min)。共开展6组试验,每组试验中微流体芯片仅用1次。

1.4 图像处理

为了准确识别微流体芯片中水相面积以及水-气界面位置,采用图3所示流程进行后处理。基于MATLAB图像处理工具箱,笔者提出了一种算法将原始照片转化为二值图。首先将初始时刻充满液相的图片(图3(b))与待处理图片(图3(a))灰度值矩阵相减,统计发现,发生驱替的像素点灰度值变化 35 ± 5 ,而不发生驱替的点灰度值变化小于5。因此,以灰度差阈值(取20)进行二值化,得到气相部分(图3(c))、液相部分(图3(d)),并由此计算两相的饱和度。其次,对图3(c)、(d)进行边界检测,得到气相界面(图3(e))、液相界面(图3(f))。将湿润相界面划分为驱替前缘(图3(g)红色线段)与捕获区界面(图3(g)蓝色线段),发生在驱替前缘之外的为主体流排水(图3(f)红色面积),发生在捕获区之内的部分为角膜-液桥排水(图3(f)蓝色面积)。

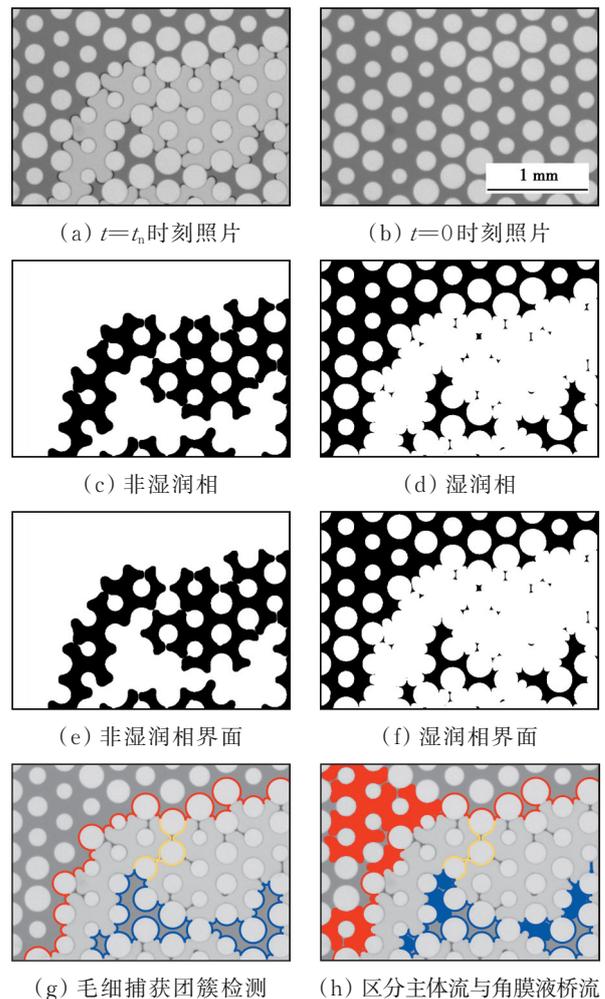


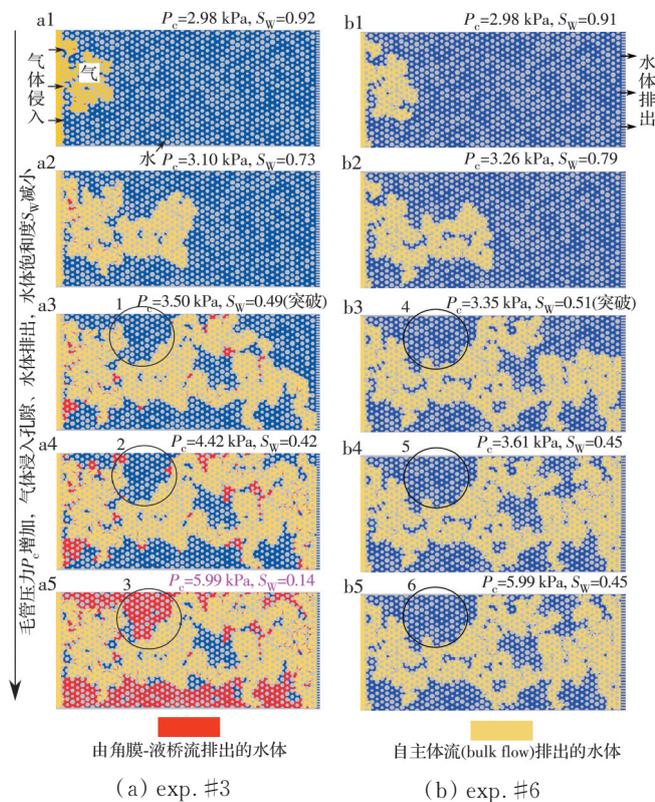
图 3 图像处理流程

Fig. 3 Image processing procedure

2 结果与讨论

2.1 多相渗流过程与角膜-液桥流的观测

在排水条件下,随着水箱高程的减小(图 1(a)),多孔介质的毛管压力 P_c 增加,气体侵入孔隙,水体排出孔隙,水体饱和度 S_w 逐渐减小。图 4 给出了 5 种不同毛管压力值对应的平衡状态下水、气两相流体的分布。图 4(a)、(b)分别为 exp. #3 和 exp. #6 的试验结果。由图 4 可知,随着 P_c 的增加,气体的入侵过程表现为毛细指进,即水-气界面呈现出极其不稳定的驱替形态^[25, 37],这种不稳定的驱替界面导致水体无法全部排出。当气体达到出口边界(右侧)时,即入侵相流体突破,多孔介质中的水体表现出孤立的、被捕获的团簇,如图 4 中的圆圈 1、4 所示。



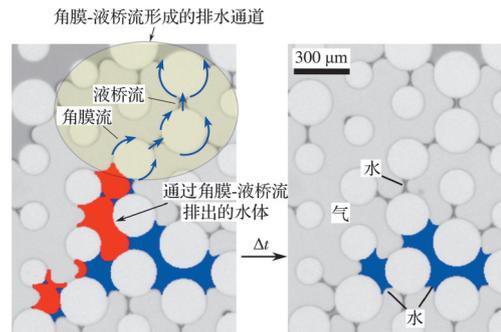
注:红色区域代表由角膜-液桥流排出的水体;黄色为主体流(bulk flow)排出的水体。

图 4 多孔介质排水条件下水-气多相渗流过程的试验观测
Fig. 4 Experimental observation of water-gas multiphase flow in porous media under drainage conditions

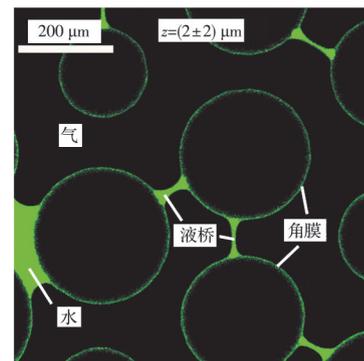
经典理论认为,被捕获的湿润相团簇受到毛细力的控制,不会发生流动^[38-40]。然而,在试验中(exp. #3),被捕获的团簇在平衡过程中(毛管压力保持不变,系统静置 2 h)体积不断变小,如圆圈 2、3 中的红色区域。

为了研究被捕获水体的排出机制,采用微距镜头和共聚焦显微镜观测被捕获区域的水体分布。由图 5(a)可见,存在一个由角膜和液桥组成的通

道,这个流动通道由两个部分组成,一是围绕在颗粒之间的角膜,二是连接两个颗粒的液桥。由图 5(a)可知,被捕获的水体团簇通过角膜和液桥组成的通道进行排水,进而使团簇面积减小(见图 4(a)中的圆圈 3)。图 5(b)展示了在共聚焦显微镜下荧光染色水的分布,微流体芯片厚度约 $40\ \mu\text{m}$,在贴近底部的 $z=(2\pm 2)\ \mu\text{m}$ 高度处,可以同时观察到颗粒之间的液桥以及围绕在颗粒周围的角膜,进一步证实了角膜和液桥的存在。



(a) 孔隙尺度下的角膜-液桥流



(b) 共聚焦电子显微镜观察到的角膜和液桥

图 5 角膜-液桥流的细观观测

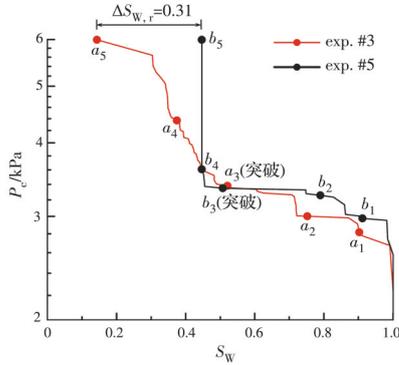
Fig. 5 Pore scale visualization of corner-bridge flow

对比图 4(a)、(b)可知,角膜-液桥流仅在颗粒壁面粗糙的试验组(exp. #3)中出现,在 exp. #6 中,微流体芯片孔隙壁面光滑,角膜-液桥流没有发生。在光滑条件下,被捕获的水体团簇(如图 4 中的圆圈 4、5、6)保持静止状态,不发生排水,根本原因是颗粒壁面形成角膜流需要湿润相接触角小于临界值^[29]。当表面粗糙度增大时,相应的接触角减小^[41],而对于试验中光滑壁面的微流体芯片,其接触角大于临界值,角膜-液桥流不会发生。对于如何构建微流体芯片中角膜-液桥流发生条件的理论模型,需要进一步研究。

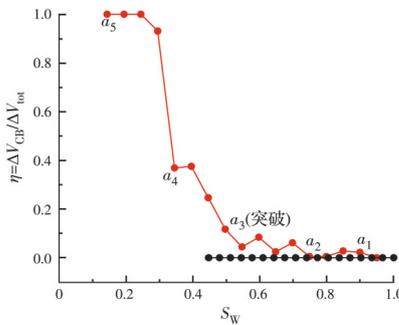
2.2 排水过程中角膜-液桥流的影响机制

为了评估角膜-液桥流对排水过程的影响,图 6 展示了 exp. #3 和 exp. #6 的毛管压力曲线以及通过角膜-液桥流动通道的排水量占总排水量的比值,

分别如图 6(a)、(b)所示。图中红色曲线代表颗粒壁面粗糙的试验组(exp. #3),其中存在角膜-液桥流现象,而黑色曲线代表颗粒壁面光滑的试验组(exp. #6),仅有主体流。



(a) exp. #3 和 exp. #6 的毛管压力曲线



(b) 通过角膜-液桥通道排出的水的体积在总排水体积中的占比

图 6 角膜-液桥流的影响机制

Fig. 6 Mechanism of corner-bridge flow

在突破前阶段,由于仅存在有限数量的被捕获团簇(参见图 4 中的 a1~a2, b1~b2),排水过程以主体流为主。此阶段 exp. #3 和 exp. #6 的毛管压力曲线趋于接近(图 6(a)),且在 exp. #3 中通过角膜-液桥流动通道的排水量占总排水量的比例极低,统计结果为 $\eta < 0.05$ (图 6(b))。

而在突破后阶段,由于大部分水以被捕获团簇的形式存在(参见图 4 中 a3, b3),在 exp. #3 中,通过角膜-液桥通道进行排水的比例逐渐上升(图 6(b))。当位于出口的水完全排出后(a4~a5, b4~b5),剩余水分全部以被捕获的形式存在(参见图 4 中 a4, b4)。在 exp. #6 中,因仅有主体流存在,饱和度不再发生变化,毛管压力曲线呈现为垂直直线(b4~b5)。而在 exp. #3 中,被捕获团簇水仍能持续通过角膜-液桥通道流动,导致饱和度持续降低。因此,exp. #3 和 exp. #6 之间的饱和度差异逐渐扩大,最终达到 $\Delta S_{w,r} = 0.31$ 。

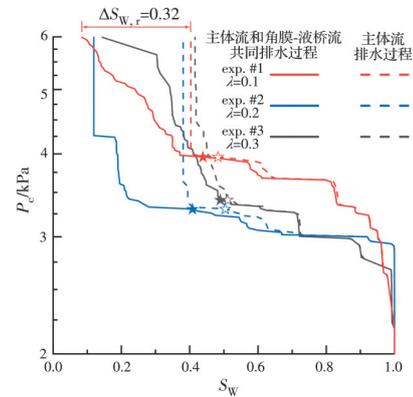
试验结果表明,角膜-液桥流主要在突破后饱和度较低的阶段产生显著影响,特别是在残余阶段

(a4~a5),甚至可能导致水分完全通过角膜-液桥通道流动($\eta \approx 1$,参见图 6)。多孔介质在自然界中广泛存在,其表面往往呈现出粗糙结构,使得角膜-液桥流现象较为常见且重要。在饱和度较低条件下,角膜-液桥流很可能成为水体流动的主导模式,因此,充分考虑角膜-液桥流现象对于准确评估干旱地区可获得水资源量至关重要。

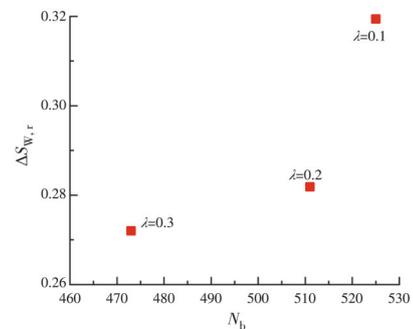
2.3 角膜-液桥流对毛管压力曲线的影响

为研究不同孔隙结构下角膜-液桥流对毛管压力曲线的影响,在不同非均质性和孔隙率条件下开展排水试验。图 7(a)展示了 exp. #1~exp. #3 的毛管压力曲线,其中孔隙率 $\phi = 0.54$,非均质性 λ 分别为 0.1、0.2、0.3;图 8(a)展示了 exp. #3~exp. #5 的毛管压力曲线,其中非均质性 $\lambda = 0.3$,孔隙率 ϕ 分别为 0.54、0.66、0.76。图中,虚线表示仅考虑通过主体流的排水过程,而实线则同时考虑了通过主体流和角膜-液桥通道的排水过程,五角星表示突破时刻。

需说明的是,exp. #3 在毛管压力接近测量最大值时发生一次饱和度快速下降,这是因为 exp. #3 具有最多小开度喉道(见图 1(c)喉道开度分布),在



(a) 毛管压力曲线



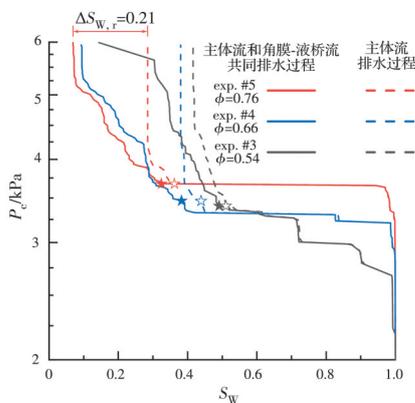
(b) 角膜-液桥流引起的残余饱和度差异值与液桥数量的关系

图 7 不同非均质系数条件下角膜-液桥流对毛管压力曲线的影响

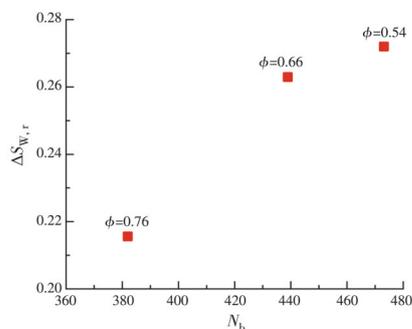
Fig. 7 Impact of corner-bridge flow on capillary pressure curves with various heterogeneity coefficients

排水末期流速极慢,在一个检测时间内(15 min)没有发现新的驱替,于是增大压力直到15 min内能够检测到新的驱替,导致连续几次加压后发生一次饱和度快速下降。这一过程流速仍然极慢,但不影响排水的最终状态。

在突破前,角膜-液桥流对流动过程的影响较小,此时考虑角膜-液桥流现象的毛管压力曲线与仅考虑主体流的曲线非常接近。然而,当突破发生后,角膜-液桥流的作用变得显著,随着毛细压力的增加,角膜-液桥流引起的饱和度差异逐渐扩大。当压力增大到6 kPa时,饱和度差异达到最大,即残余饱和度差异 $\Delta S_{w,r}$ 。图7(b)和图8(b)分别展示了exp. #1~exp. #3和exp. #3~exp. #5中由角膜-液桥流引起的残余饱和度差异值 $\Delta S_{w,r}$ 。图中横坐标表示液桥出现的数量 N_b 。由图可见, N_b 和 $\Delta S_{w,r}$ 呈正相关关系,这是因为液桥数量的增加导致更多角膜-液桥通道的形成,进而促使更多被捕获团簇可以通过角膜-液桥通道流动,从而降低了残余饱和度。随着介质非均质性和孔隙率的降低,液桥的数量逐渐增多,角膜-液桥流的影响也变得更加显著。



(a) 毛管压力曲线



(b) 角膜-液桥流引起的残余饱和度差异值与液桥数量的关系

图8 不同孔隙率条件下角膜-液桥流对毛管压力曲线的影响

Fig. 8 Impact of corner-bridge flow on capillary pressure curves with various porosities

试验采用的较小尺寸二维孔隙结构不能完全反映真实三维多孔介质中的角膜-液桥流。在真实的三维多孔介质中,由于固相颗粒在重力作用下形成相互接触的堆积结构,其孔隙率往往更低,且孔隙非均质性越强,孔隙率越低。由此可以推测,在真实三维多孔介质中,角膜-液桥流对排水残余饱和度的影响更大。试验的毛管压力控制系统、驱替类型划分方法可以应用至三维试验中,然而常规的光学可视化试验技术难以精确计算复杂三维介质中两相流体的分布,因此,可能需要基于CT三维成像技术开展更长时间的试验,以进一步研究真实三维多孔介质中角膜-液桥流的影响。

3 结论

采用自主搭建的微流体芯片-高清相机试验平台,开展多孔介质微流体芯片中排水过程的可视化试验,发现一种称为“角膜-液桥流”的现象,深入探讨其影响机制以及在不同孔隙结构条件下对毛管压力曲线的影响。主要结论如下:

1)在排水过程中,角膜-液桥流为湿润相提供了额外的流动通道,使被毛细捕获的湿润相团簇能通过角膜-液桥通道流动,从而降低湿润相的残余饱和度。

2)多孔介质表面的粗糙度导致湿润相的接触角降低,甚至可能低于角膜,出现所需的临界值,从而引发角膜-液桥流现象。在自然界中,多孔介质表面通常呈现较为粗糙的形态,因此,角膜-液桥流现象在自然界中较为普遍。

3)在突破前,流动过程以主体流为主,而在突破后,流动过程受到角膜-液桥流主导,因此,在饱和度较低的地区,角膜-液桥流可能成为多相渗流的主要模式。

4)角膜-液桥流引起的残余饱和度差异与液桥的数量呈正相关关系。随着介质非均质性和孔隙率减小,液桥数量逐渐增加,残余饱和度差异也逐渐增大。自然界中的三维多孔介质孔隙率往往较低,因而角膜-液桥流的影响也更加显著。

参考文献

- [1] XIAO Y H, HE Y M, ZHENG J, et al. Modeling of two-phase flow in heterogeneous wet porous media [J]. *Capillarity*, 2022, 5(3): 41-50.
- [2] 蔡建超. 多孔介质自发渗吸关键问题与思考[J]. *计算物理*, 2021, 38(5): 505-512.
- CAI J C. Some key issues and thoughts on spontaneous imbibition in porous media [J]. *Chinese Journal of Com-*

- putational Physics, 2021, 38(5): 505-512. (in Chinese)
- [3] JIN T X, CAI X, CHEN Y, et al. A fractal-based model for soil water characteristic curve over entire range of water content [J]. *Capillarity*, 2019, 2(4): 66-75.
- [4] 谭晓慧, 李丹, 沈梦芬, 等. 土水特征曲线参数的概率统计及敏感性分析[J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, 34(6): 97-103.
- TAN X H, LI D, SHEN M F, et al. Probability statistics and sensitivity analysis of parameters of soil-water characteristic curves [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2012, 34(6): 97-103. (in Chinese)
- [5] 胡冉, 陈益峰, 周创兵. 考虑变形效应的非饱和土相对渗透系数模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(6): 1279-1287.
- HU R, CHEN Y F, ZHOU C B. A relative hydraulic conductivity model for unsaturated deformable soils [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(6): 1279-1287. (in Chinese)
- [6] 胡冉, 钟翰贤, 陈益峰. 变开度岩体裂隙多相渗流实验与有效渗透率模型[J]. *力学学报*, 2023, 55(2): 543-553.
- HU R, ZHONG H X, CHEN Y F. Multi-phase seepage experiment and effective permeability model of rock fracture with variable opening [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(2): 543-553. (in Chinese)
- [7] 曹春山, 吴树仁, 潘懋, 等. 工程切坡诱发黄土滑坡成因机制研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(4): 1049-1060.
- CAO C S, WU S R, PAN M, et al. Mechanism research on artificial slope cutting-induced loess landslide [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(4): 1049-1060. (in Chinese)
- [8] 林鸿州, 李广信, 于玉贞, 等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J]. *岩土力学*, 2007, 28(9): 1931-1936.
- LIN H Z, LI G X, YU Y Z, et al. Influence of matric suction on shear strength behavior of unsaturated soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(9): 1931-1936. (in Chinese)
- [9] 豆红强, 韩同春, 龚晓南. 降雨条件下考虑裂隙土孔隙双峰特性对非饱和土边坡渗流场的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增刊2): 4373-4379.
- DOU H Q, HAN T C, GONG X N. Effects of bimodal characteristics of fractured soil pore on seepage field of unsaturated soil slope [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Sup 2): 4373-4379. (in Chinese)
- [10] 唐栋, 祁小辉, 蒋水华, 等. 不同前期降雨与土-水特征曲线对边坡稳定的影响[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(增刊1): 148-155.
- TANG D, QI X H, JIANG S H, et al. Effect of different antecedent rainfalls and SWCCs on slope stability [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(Sup 1): 148-155. (in Chinese)
- [11] 孙长宇, 王文强, 陈光进, 等. 注 CO₂ 油气藏流体体系油/水和油/气界面张力实验研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2006, 30(5): 109-112.
- SUN C Y, WANG W Q, CHEN G J, et al. Interfacial tension experiment of oil and water, oil and gas for CO₂ injected reservoir fluid system [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2006, 30(5): 109-112. (in Chinese)
- [12] 张玉军. 核废物地质处置中热-水-应力耦合对迁移影响的三维有限元模拟[J]. *岩土力学*, 2009, 30(7): 2126-2132.
- ZHANG Y J. 3D finite element simulation for influence of thermo-hydro-mechanical coupling on migration in geological disposal of nuclear waste [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(7): 2126-2132. (in Chinese)
- [13] 李小春, 袁维, 白冰. CO₂地质封存力学问题的数值模拟方法综述[J]. *岩土力学*, 2016, 37(6): 1762-1772.
- LI X C, YUAN W, BAI B. A review of numerical simulation methods for geomechanical problems induced by CO₂ geological storage [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(6): 1762-1772. (in Chinese)
- [14] PINI R, KREVIOR S C M, BENSON S M. Capillary pressure and heterogeneity for the CO₂/water system in sandstone rocks at reservoir conditions [J]. *Advances in Water Resources*, 2012, 38: 48-59.
- [15] WU D S, HU R, LAN T A, et al. Role of pore-scale disorder in fluid displacement: Experiments and theoretical model [J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(1): e2020WR028004.
- [16] 桑进, 刘文化, 张洪勇, 等. 全吸力范围内固化土的土-水特征曲线试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(增刊1): 3842-3850.
- SANG J, LIU W H, ZHANG H Y, et al. Experimental study of soil-water characteristic curve of solidified soil in full suction range [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(Sup 1): 3842-3850. (in Chinese)
- [17] 伏映鹏, 廖红建, 吕龙龙, 等. 考虑接触角及粒径级配影响的土水特征曲线滞回模型[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(3): 502-513.
- FU Y P, LIAO H J, LÜ L L, et al. Hysteretic model for fitting soil-water characteristic curves considering contact angle and grain-size distribution [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(3): 502-513. (in Chinese)
- [18] 魏鹤举, 胡冉, 廖震, 等. 湿润性对孔隙介质两相渗流驱替效率的影响[J]. *力学学报*, 2021, 53(4): 1008-1017.

- WEI G J, HU R, LIAO Z, et al. Effects of wettability on displacement efficiency of two-phase flow in porous media [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(4): 1008-1017. (in Chinese)
- [19] WANG S B, TOKUNAGA T K. Capillary pressure-saturation relations for supercritical CO₂ and brine in limestone/dolomite sands: implications for geologic carbon sequestration in carbonate reservoirs [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(12): 7208-7217.
- [20] KHISHVAND M, ALIZADEH A H, PIRI M. In-situ characterization of wettability and pore-scale displacements during two- and three-phase flow in natural porous media [J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 97: 279-298.
- [21] GOLMOHAMMADI S, DING Y, KUECHLER M, et al. Impact of wettability and gravity on fluid displacement and trapping in representative 2D micromodels of porous media (2D sand analogs) [J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(10): e2021WR029908.
- [22] MOURA M, FLEKKØY E G, MÅLØY K J, et al. Connectivity enhancement due to film flow in porous media [J]. *Physical Review Fluids*, 2019, 4(9): 094102.
- [23] OR D, TULLER M. Liquid retention and interfacial area in variably saturated porous media: Upscaling from single-pore to sample-scale model [J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(12): 3591-3605.
- [24] MOURA M, FIORENTINO E A, MÅLØY K J, et al. Impact of sample geometry on the measurement of pressure-saturation curves: Experiments and simulations [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(11): 8900-8926.
- [25] LAN T A, HU R, GUO W, et al. Direct prediction of fluid-fluid displacement efficiency in ordered porous media using the pore structure [J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(7): e2021WR031875.
- [26] HU R, WAN J, KIM Y, et al. Wettability impact on supercritical CO₂ capillary trapping: Pore-scale visualization and quantification [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53: 6377-6394.
- [27] 胡冉, 陈益峰, 万嘉敏, 等. 超临界 CO₂-水两相流与 CO₂ 毛细捕获: 微观孔隙模型实验与数值模拟研究[J]. *力学学报*, 2017, 49(3): 638-648.
- HU R, CHEN Y F, WAN J M, et al. Supercritical CO₂ water displacements and CO₂ capillary trapping: Micro-model experiment and numerical simulation [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(3): 638-648. (in Chinese)
- [28] ZHAO B Z, MACMINN C W, JUANES R. Wettability control on multiphase flow in patterned microfluidics [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(37): 10251-10256.
- [29] HOOGLAND F, LEHMANN P, MOKSO R, et al. Drainage mechanisms in porous media: From piston-like invasion to formation of corner flow networks [J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(11): 8413-8436.
- [30] 李明玉, 孙文静, 黄强, 等. 全吸力范围生物炭-黏土混合土的土-水特性[J]. *岩土力学*, 2022, 43(10): 2717-2725.
- LI M Y, SUN W J, HUANG Q, et al. Soil-water characteristics of biochar-clay mixed soil in full suction range [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(10): 2717-2725. (in Chinese)
- [31] 李旭, 刘阿强, 刘丽, 等. 全吸力范围内土-水特征曲线的快速测定方法[J]. *岩土力学*, 2022, 43(2): 299-306.
- LI X, LIU A Q, LIU L, et al. A rapid method for determining the soil-water characteristic curves in the full suction range [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(2): 299-306. (in Chinese)
- [32] 张悦, 叶为民, 王琼, 等. 含盐遗址重塑土的吸力测定及土水特征曲线拟合[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(9): 1661-1669.
- ZHANG Y, YE W M, WANG Q, et al. Suction measurement and SWRC modelling for reconstituted salt-laden soils in earthen heritages [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(9): 1661-1669. (in Chinese)
- [33] 谭晓慧, 余伟, 沈梦芬, 等. 土-水特征曲线的试验研究及曲线拟合[J]. *岩土力学*, 2013, 34(增刊 2): 51-56.
- TAN X H, YU W, SHEN M F, et al. Experimental study and curve fitting of soil-water characteristic curve [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(Sup 2): 51-56. (in Chinese)
- [34] 孙德安, 刘文捷, 吕海波. 桂林红黏土的土-水特征曲线[J]. *岩土力学*, 2014, 35(12): 3345-3351.
- SUN D A, LIU W J, LÜ H B. Soil-water characteristic curve of Guilin lateritic clay [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(12): 3345-3351. (in Chinese)
- [35] 叶为民, 白云, 金麒, 等. 上海软土土水特征的室内试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(2): 260-263.
- YE W M, BAI Y, JIN Q, et al. Lab experimental study on soil-water characteristics of Shanghai soft clay [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(2): 260-263. (in Chinese)
- [36] WANG X, YIN H W, ZHAO X A, et al. Microscopic remaining oil distribution and quantitative analysis of polymer flooding based on CT scanning [J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2019, 3(4): 448-456.

- [37] KONG D B, GAO Y B, SARMA H, et al. Experimental investigation of immiscible water-alternating-gas injection in ultra-high water-cut stage reservoir [J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2021, 5(2): 139-152.
- [38] HU R, LAN T A, WEI G J, et al. Phase diagram of quasi-static immiscible displacement in disordered porous media [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 875: 448-475.
- [39] BLUNT M J, SCHER H. Pore-level modeling of wetting [J]. *Physical Review E*, 1995, 52(6): 6387-6403.
- [40] JERAULD G R, SALTER S J. The effect of pore-structure on hysteresis in relative permeability and capillary pressure: Pore-level modeling [J]. *Transport in Porous Media*, 1990, 5(2): 103-151.
- [41] WENZEL R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water [J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1936, 28(8): 988-994.

(编辑 胡英奎)