

Percolation Characteristics of Oil-Water Two-Phase Fluids in Micro Channels

Min Li, Dongxu Liu, Mingtao Yu, Lei Liu*

State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi
Email: min_lee56@163.com

Received: Aug. 20th, 2018; accepted: Sep. 3rd, 2018; published: Sep. 11th, 2018

Abstract

The flow in micro channels is the microscopic foundation of the flow in porous media. Based on the flow in micro channels, the percolation unit model was developed for the oil-water two-phase flow in a porous medium. This model indicates that the relative permeabilities of oil-water two-phase flow in a porous medium are related to the phase geometry distribution and fluid saturation in micro channels, but have nothing to do with the porosity of the porous medium. An experimental device is designed in which the micro channels are fabricated by microfluidic technology. The percolation characteristics of two-phase flow in the micro channels are experimentally investigated in such device with immiscible oil and water as fluids. The experimental data show that the relative permeability curves of oil-water two-phase flow are approximately the same for the micro channels with similar geometry sizes, but obviously different for the micro channels with distinct geometry sizes. In addition to the fluid saturation and the pressure drop, the total volume flow rate is discovered to be a parameter affecting the relative permeability of oil-water two-phase flow. The experimental results are consistent with the inferences drawn from the percolation unit model developed.

Keywords

Oil-Water Two-Phase Flow, Percolation, Relative Permeability, Micro Channels, Flow Characteristics

微通道中油水两相的渗流特性研究

李 敏, 刘冬旭, 于明涛, 刘 磊*

西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安
Email: min_lee56@163.com

收稿日期: 2018年8月20日; 录用日期: 2018年9月3日; 发布日期: 2018年9月11日

*通讯作者。

摘要

微通道渗流是多孔介质渗流的微观基础。以微通道渗流为前提,建立了油水两相渗流的单元模型,该模型表明油水两相的相对渗透率与多孔介质的孔隙度无关,相对渗透率只与微通道中相态分布的几何尺度以及流体饱和度等参数有关。采用微流控技术加工了不同尺寸的微通道,以去离子水和白油为两相流体,实验研究了油水两相在不同尺寸微通道中的渗流特性。实验数据表明,对于相同尺度等级的微通道,油水两相渗流的平均相对渗透率曲线类似;对于尺度等级明显不同的微通道,油水两相渗流的平均相对渗透率曲线有显著差异。体积含油率或者流体饱和度不是影响相对渗透率的唯一因素,相对渗透率还与两相渗流的总体积流量等参数有关。实验所得结论与渗流单元模型的推论相符。

关键词

油水两相流, 渗流, 相对渗透率, 微通道, 流动特性

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

油水两相的渗流特性是油藏数值模拟和试井分析的基础[1]。微通道渗流是多孔介质渗流的微观本质,研究微通道中的两相渗流特性对于认识多孔介质中的两相渗流规律有重要意义。一些经验关系式表明,相对渗透率通常与毛管数、邦德数、流体物性、饱和度等参数有关,微观渗流规律的不同导致了低渗透油藏相对渗透率的变化规律不同于传统高渗透油藏[2]。对油藏多相渗流的研究,通常重点关注油与水的相对渗透率[3] [4]。相对渗透率是多相渗流的重要特性参数,是微通道中多相流物理特性的表现[5]。在微通道中研究多相微流动特性,揭示相对渗透率的变化规律,已成为多相渗流研究的一种趋势[6] [7] [8]。本文在多孔介质毛细管模型的基础上,建立渗流单元模型,将达西渗流定律与两相渗流分相模型相结合,提出油水相对渗透率计算新模型,通过研究微通道中的油水两相渗流,认识多孔介质中油水两相的渗流特性。

2. 渗流单元模型

2.1. 渗流单元与绝对渗透率

设孔隙度为 ϕ 的多孔介质包含 n 个微通道,长度都为 L ,则可将该多孔介质划分为 n 个渗流单元,每个渗流单元的孔隙度也为 ϕ 并且包含一个长度为 L 的微通道,如图1所示。渗流单元上的微通道可以是圆形截面、矩形截面或者其他几何形状的截面。设第 i 个微通道位于第 i 个渗流单元上,每个渗流单元的压降相同。

渗流速度又称为表观速度[9]。对于微通道中的两相渗流,若假设孔隙度 $\phi=1$,则其渗流速度就是两相流中的表观速度。对于单相流动,设 u_{ip} 为流体在第 i 个微通道中的真实平均流速, J_i 为第 i 个渗流单元的渗流速度,则渗流速度与真实平均流速的关系为

$$J_i = \phi u_{ip} \quad (1)$$

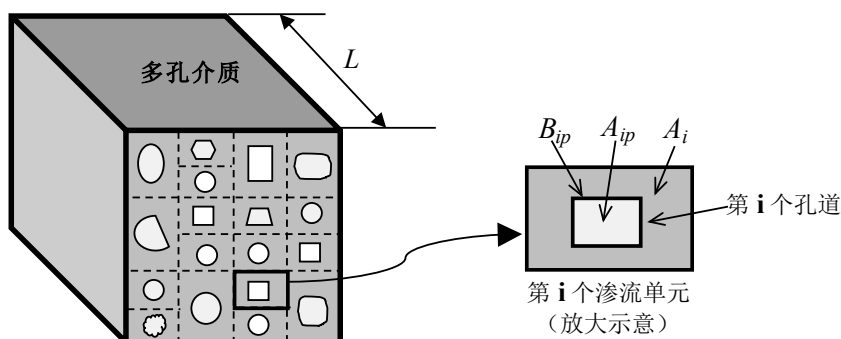


Figure 1. Percolation unit model

图 1. 渗流单元物理模型

由 Darcy-Weisbach 公式, 单相流体在第 i 个微通道中的平均流速与摩擦压降之间的关系为

$$\frac{\Delta p_f}{L} = \frac{1}{8} \lambda_{ip} \rho u_{ip}^2 \frac{B_{ip}}{A_{ip}} \quad (2)$$

其中, λ_{ip} 为达西摩擦系数, ρ 为流体密度, u_{ip} 为流体在第 i 个微通道中的平均流速, B_{ip} 为第 i 个微通道中的流体湿周, A_{ip} 为第 i 个微通道的横截面积。

渗流一般为层流, 其达西摩擦阻力系数为

$$\lambda_{ip} = \frac{64}{Re_{ip}} = \frac{64\mu}{u_{ip}\rho d_{ip}} \quad (3)$$

式(3)中, Re_{ip} 为第 i 个微通道中流体流动的雷诺数, μ 为流体动力粘度, d_{ip} 为水力直径。若第 i 个渗流单元上是非圆形截面微通道, 则其水力直径为

$$d_{ip} = \frac{4A_{ip}}{B_{ip}} = \frac{4\phi A_i}{B_{ip}} \quad (4)$$

若 A_i 为第 i 个渗流单元的面积, 依据前述假设每个渗流单元的孔隙度都为 ϕ , 则微通道横截面积 A_{ip} 与渗流单元面积 A_i 两者之间的关系为

$$A_{ip} = \phi A_i \quad (5)$$

由式(1)~(5)可得

$$J_i = \frac{\phi^3 A_i^2}{2B_{ip}^2} \frac{1}{\mu} \frac{\Delta p_f}{L} \quad (6)$$

第 i 个渗流单元上的达西渗流公式可表示为

$$J_i = \frac{k_i}{\mu} \frac{\Delta p_f}{L} \quad (7)$$

比较式(5)和式(6), 第 i 个渗流单元上的绝对渗透率为

$$k_i = \frac{1}{2} \frac{\phi^3 A_i^2}{B_{ip}^2} \quad (8)$$

式(8)表明, 绝对渗透率 k_i 只与孔隙度以及微通道的几何尺度有关。

若知道各个渗流单元的渗流速度, 再结合式(6)~(8), 多孔介质的平均渗流速度为

$$J = \frac{\sum_{i=1}^n J_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{1}{\mu} \frac{\Delta p_f}{L} \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \phi^3 \frac{A_i^3}{B_{ip}^2}}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (9)$$

其中各个渗流单元面积的总和 $\sum_{i=1}^n A_i$ 就是多孔介质的渗流面积。与 Darcy 渗流定律 $J = \frac{k}{\mu} \frac{\Delta p_f}{L}$ 相比较, 多孔介质的绝对渗透率为[10] [11]

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n k_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (10)$$

式(10)表明, 若各渗流单元的孔隙率相同, 则多孔介质的绝对渗透率是各渗流单元绝对渗透率的加权平均, 权重就是渗流单元面积与渗流总面积的比值。通过研究渗流单元上的渗透率 k_i , 可认识多孔介质渗透率的特征。

式(10)同时表明, 若多孔介质微通道中的流动状态为层流, 则多孔介质的绝对渗透率 k 只与多孔介质的几何特性有关, 与流体性质无关。

2.2. 两相渗流的相对渗透率

相对渗透率是多相渗流的重要参数, 由管道两相流的分相模型可推导出相对渗透率的具体表达式。对于多孔介质中第 i 个微通道中的油水两相流, 动量方程中的惯性力相对于压力、重力、粘性力和毛管力等可忽略, 相间阻力也可忽略, 则分相模型的动量方程为[12]

$$\phi A_i S_{ipw} \frac{dp_w}{dx} + \frac{1}{8} \lambda_{ipw} \rho_w u_{ipw}^2 B_{ipw} + \phi A_i S_{ipw} \rho_w g \sin \theta = 0 \quad (11)$$

$$\phi A_i S_{ipo} \frac{dp_o}{dx} + \frac{1}{8} \lambda_{ipo} \rho_o u_{ipo}^2 B_{ipo} + \phi A_i S_{ipo} \rho_o g \sin \theta = 0 \quad (12)$$

对于油和水, 第 i 个微通道中的平均流速与第 i 个渗流单元的渗流速度两者间的关系为

$$J_{iw} = \phi S_{ipw} u_{ipw} = \phi \frac{Q_{ipw}}{A_{ip}} \quad (13)$$

$$J_{io} = \phi S_{ipo} u_{ipo} = \phi \frac{Q_{ipo}}{A_{ip}} \quad (14)$$

式(11)~(14)中, S 为微通道中的相份额(对于管流)或者流体饱和度(对于渗流), p 为压力, x 为长度坐标, λ 为达西摩擦系数, u 为流体在微通道中的平均流速, ρ 为密度, J 为流体的渗流速度, Q 为体积流量; 下标 i 表示第 i 个渗流单元, 下标 p 表示微通道中的参数, 下标 w 表示水, 下标 o 表示油; θ 为倾斜向上方向与水平线的夹角, 流动方向倾斜向上时 θ 为正值, 倾斜向下时 θ 为负值; 饱和度 $S_{ipw} + S_{ipo} = 1$ 。式(11)和式(12)中, p_w 与 p_o 的不同之处在于毛管力。

渗流一般为层流, 水与油的达西摩擦系数分别为

$$\lambda_{ipw} = \frac{64}{Re_{ipw}} = \frac{64\mu_w}{u_{ipw}\rho_w d_{ipw}} \quad (15)$$

$$\lambda_{ipo} = \frac{64}{Re_{ipo}} = \frac{64\mu_o}{u_{ipo}\rho_o d_{ipo}} \quad (16)$$

式(15)和式(16)中, d_{ipw} 和 d_{ipo} 分别为第 i 个微通道中水相与油相的水力直径, 表示为

$$d_{ipw} = \frac{4A_i\phi S_{ipw}}{B_{ipw}} \quad (17)$$

$$d_{ipo} = \frac{4A_i\phi S_{ipo}}{B_{ipo}} \quad (18)$$

压降与压力梯度的关系为

$$\frac{dp_w}{dx} = -\frac{\Delta p_w}{L} \quad (19)$$

$$\frac{dp_o}{dx} = -\frac{\Delta p_o}{L} \quad (20)$$

将式(13)、(15)、(17)和(19)代入式(11), 将式(14)、(16)、(18)和(20)代入(12), 则水与油的动量方程分别变为

$$J_{iw} = \frac{\phi^3 A_i^2 S_{ipw}^3}{2B_{ipw}^2} \cdot \frac{1}{\mu_w} \left(\frac{\Delta p_w}{L} + \rho_w g \sin \theta \right) \quad (21)$$

$$J_{io} = \frac{\phi^3 A_i^2 S_{ipo}^3}{2B_{ipo}^2} \cdot \frac{1}{\mu_o} \left(\frac{\Delta p_o}{L} + \rho_o g \sin \theta \right) \quad (22)$$

尽管 p_w 与 p_o 的因毛管力而不同, 但是压降 Δp_w 和 Δp_o 并不因毛管力而不同, 因此有 $\Delta p_w = \Delta p_o = \Delta p$, 由该条件并将式(8)代入式(21)和(22), 整理后可得,

$$J_{iw} = \frac{k_{irw} k_i}{\mu_w} \left(\frac{\Delta p}{L} + \rho_w g \sin \theta \right) \quad (23)$$

$$J_{io} = \frac{k_{iro} k_i}{\mu_o} \left(\frac{\Delta p}{L} + \rho_o g \sin \theta \right) \quad (24)$$

$$k_{irw} = S_{ipw}^3 \left(\frac{B_{ip}}{B_{ipw}} \right)^2 \quad (25)$$

$$k_{iro} = S_{ipo}^3 \left(\frac{B_{ip}}{B_{ipo}} \right)^2 \quad (26)$$

其中, k_{irw} 和 k_{iro} 分别为第 i 个渗流单元上水与油的相对渗透率。

显然, 第 i 个渗流单元上的相对渗透率与孔隙度无关, 而是微通道总湿周、油水两相在微通道中的饱和度及其湿周等参数的函数。由于流体在微通道中的饱和度以及湿周与相态分布有关, 因此, 两相流的相态分布影响相对渗透率。

对式(23)和式(24)所表示的渗流速度进行面积加权平均, 就可得到油水两相在多孔介质中的相对渗透率, 即

$$J_w = \frac{\sum_{i=1}^n J_{iw} A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{1}{\mu_w} \left(\frac{\Delta p}{L} + \rho_w g \sin \theta \right) \frac{\sum_{i=1}^n k_{irw} k_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (27)$$

$$J_o = \frac{\sum_{i=1}^n J_{io} A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{1}{\mu_o} \left(\frac{\Delta p}{L} + \rho_o g \sin \theta \right) \frac{\sum_{i=1}^n k_{iro} k_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (28)$$

多孔介质中油水两相的渗流方程为[10] [11]

$$J_w = \frac{k_{rw} k}{\mu_w} \left(\frac{\Delta p}{L} + \rho_w g \sin \theta \right) \quad (29)$$

$$J_o = \frac{k_{ro} k}{\mu_o} \left(\frac{\Delta p}{L} + \rho_o g \sin \theta \right) \quad (30)$$

将(27)和(28)分别式(29)和(30)进行比较可得

$$k_{rw} k = \frac{\sum_{i=1}^n k_{irw} k_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (31)$$

$$k_{ro} k = \frac{\sum_{i=1}^n k_{iro} k_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (32)$$

式(31)和式(32)中, k_{irw} 和 k_{iro} 分别为水与油在多孔介质中的相对渗透率, 多孔介质的绝对渗透率 k 由式(10)计算。

式(31)和式(32)表明, 知道了渗流单元上油水两相的相对渗透率 k_{irw} 和 k_{iro} , 就可由式(31)和式(32)计算出多孔介质中油水两相的相对渗透率 k_{rw} 和 k_{ro} 。鉴于此, 研究渗流单元上油水两相的相对渗透率 k_{irw} 和 k_{iro} , 是进一步认识多孔介质中油水两相的相对渗透率 k_{rw} 和 k_{ro} 的前提。 k_{irw} 和 k_{iro} 只与微通道中的流动特性有关, 下面通过微流动实验揭示相对渗透率 k_{irw} 和 k_{iro} 的变化规律。

3. 两相渗流的微流动实验

采用微流控技术加工出三个不同尺寸的微通道, 其尺寸见表 1。三个微通道的宽度近似, 深度不同。微通道 1 和微通道 2 的深度分别只有 2.4 μm 和 2.0 μm , 符合低渗透孔隙的尺度特征。微通道 3 的深度为 140 μm , 符合高渗透孔隙的尺度特征。

设计了微流动实验装置, 以去离子水和白油的乳化液为进入微通道的两相流体, 实验研究了油水两相在微通道中的渗流特性。白油的粘度为 13 mPa·s, 去离子水的粘度为 0.98 mPa·s。实验前, 油与水按给定的体积含油率配制成相应的油水乳化液。

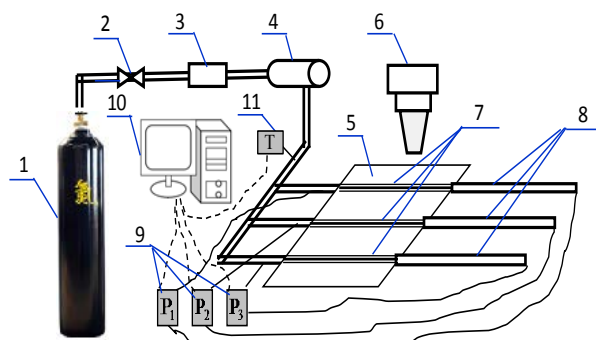
实验装置如图 2 所示, 其中高压氮气瓶(1)、减压阀(2)和压力定值器(3)提供所需要的压力, 驱动储液器(4)中的油水乳化液进入微通道(7)。微通道由微加工技术蚀刻于硅片(5)上, 硅片表面键合一层透明玻璃, 微通道中油水两相的流动状态可由显微镜(6)观测。3 组微通道水平放置($\theta = 0^\circ$), 其中的渗流压降为摩擦压降; 3 组微通道分别与不同的体积管流量计(8)连接, 由体积管流量计测量分别测量油水两相渗流的总体积流量。体积管流量计的准确度等级为 1.0 级, 按如下关系计算油水两相的体积流量, 即

$$Q_{ipw} = \beta_o Q \quad (33)$$

$$Q_{ipw} = \beta_w Q = (1 - \beta_o) Q \quad (34)$$

Table 1. Geometry of microchannels**表 1.** 微通道几何尺寸

编号 i	宽(μm)	深(μm)	长(μm)	微通道面积 A_{sp} (μm^2)	微通道周长 B_{sp} (μm)
微通道 1 ($i = 1$)	209	2.4	30,000	501.6	422.8
微通道 2 ($i = 2$)	206.7	2.0	30,000	413.4	417.4
微通道 3 ($i = 3$)	208	140	30,000	29120	696



1——氮气瓶, 2——减压阀, 3——压力定值器, 4——油水乳化液储液器, 5——硅片, 6——显微镜, 7——微通道, 8——体积管流量计, 9——差压变送器, 10——计算机, 11——温度传感器

Figure 2. The experimental device of micro flow**图 2.** 微流动实验装置

其中, β_o 和 β_w 分别为乳化液中的体积含油率与体积含水率, $\beta_w = 1 - \beta_o$ 。配制油水乳化液时, 先测定好体积含油率 β_o , 再进行配制。

微通道的摩擦压降由准确度等级为 0.25 的差压变送器(9)测量。实测压降等于微通道摩擦压降与体积管流量计摩擦压降两者之和。在实验中经检验, 体积管流量计的摩擦压降很小, 不足微通道摩擦压降的 1%, 可忽略。实验过程保持恒温, 温度由绝对误差为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的铂电阻温度传感器(11)测量。差压变送器与温度传感器的数据接入计算机数据采集系统(10)。在剔除掉不合理的数据之后得到如下实验结果。

4. 结果与讨论

实验测得的微通道压降随油水两相体积流量以及含油率的变化见图 3, 其中图 3(a)和图 3(b)分别为微通道 1 与微通道 2 的测量数据, 图 3(c)是微通道 3 的测量数据。图 3 中的数据表明, 不论是对于深度约两个微米的微通道 1 和微通道 2, 还是对于深度为一百多微米的微通道 3, 其共同的现象是对应于相同的压降 Δp , 都有明显不同的油水两相体积流量 Q 。由式(13)、(14)、(33)和(34)可知, 渗流速度与 Q 成正比, 图 3 中的数据预示着对应于相同的压降会有不同的渗流速度, 这与单相流体渗流过程中压降与流量(或渗流速度)有确定的对应关系不同。图 3 表明, 含油率 β_o 是导致同一压降下有不同渗流流量的显著影响因素。对应于相同的含油率, 流量数据与压降数据仍表现出某种确切的对应关系。显然, 含油率 β_o 是影响油水两相渗流的重要参数之一。

依据图 3 中的数据可以计算出油水两相的相对渗透率。对于均匀截面的微通道, 实验测得的压降即可认为是水的压降, 也可认为是油的压降, 即 $\Delta p_w = \Delta p_o = \Delta p$, 由于实验过程微通道水平放置, 倾角 $\theta = 0^\circ$, 依据式(5)、(13)、(14)、(23)、(24)、(33)和(34), 可得相对渗透率的计算公式

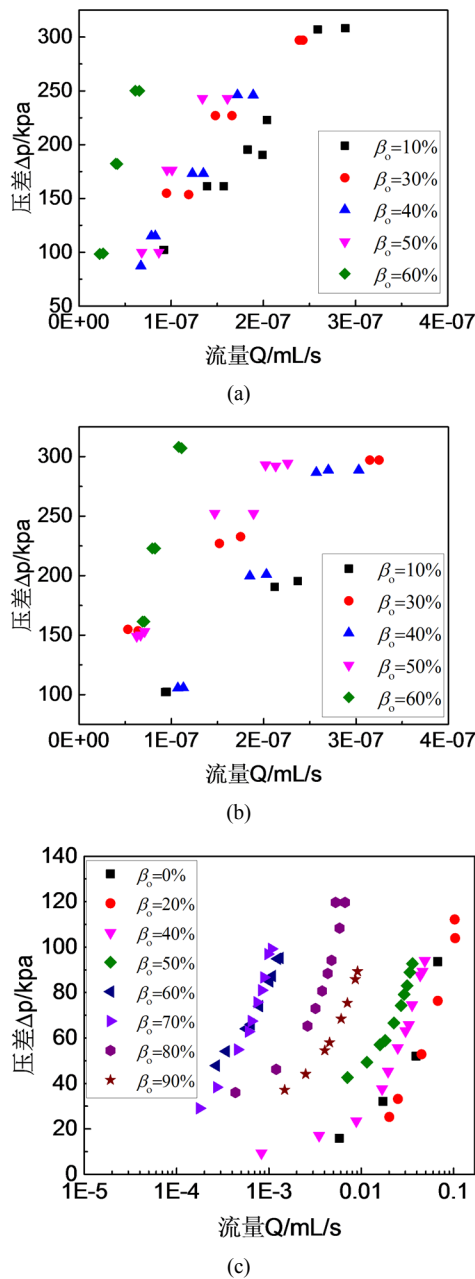


Figure 3. Change of flow rate with differential pressure and oil volume fraction. (a) Pore 1; (b) Pore 2; (c) Pore 3
图 3. 微通道压降随两相体积流量以及含油率的变化。(a) 孔道 1; (b) 孔道 2; (c) 孔道 3

$$k_{irw} = \frac{2(1 - \beta_o) Q \mu_w B_{ip}^2}{A_{ip}^3 \frac{\Delta p}{L}} \quad (35)$$

$$k_{iro} = \frac{2\beta_o Q \mu_o B_{ip}^2}{A_{ip}^3 \frac{\Delta p}{L}} \quad (36)$$

式(35)~(36)中, 长度 L 、周长 B_{ip} 、以及横截面积 A_{ip} 的测量数据见表 1。

通常将相对渗透率与流体饱和度的关系称为相对渗透率曲线。微通道中油水两相的饱和度难以实际测量, 以体积含油率 β_o 替代油的饱和度, 即假设, 依据图 3 中的压降 Δp 、流量 Q 以及含油率 β_o , 计算得到了水的相对 $S_o \approx \beta_o$ 渗透率以及油的相对渗透率, 见图 4。对各个微通道而言, 对应于相同的含油率 β_o , 有不同的相对渗透率, 图 4 中的曲线是各个微通道相对渗透率平均值的连线。

由图 4(a)可以看出, 油在微通道 1 和微通道 2 中的相对渗透率曲线类似, 这 2 个微通道都具有低渗透孔隙的尺度特征; 微通道 3 具有高渗透孔隙的尺度特征, 微通道 3 中油的平均相对渗透率曲线与微通道 1 和微通道 2 中的平均相对渗透率曲线有明显不同。

由图 4(b)可以看出, 水在微通道 1 和微通道 2 中的平均相对渗透率曲线也类似, 微通道 3 中水的平均相对渗透率曲线与微通道 1 和微通道 2 中的平均相对渗透率曲线也有明显不同。

图 4 中相对渗透率曲线的异同可由渗流单元模型解释。式(25)和式(26)表明, 相对渗透率与微通道总湿周、油水两相在微通道中的饱和度(或者相份额)及其湿周等参数有关。微通道 1 和微通道 2 的几何参数接近, 其微通道总湿周接近, 对应于相同的含油率, 油水两相在微通道中的饱和度及其湿周等参数也接近, 鉴于此, 油与水在微通道 1 和微通道 2 中都有类似的相对渗透率曲线。而微通道 3 的几何参数与微通道 1 和微通道 2 有显著差异, 对应于相同的含油率, 油水两相在微通道 3 中的湿周等参数也会与微通道 1 以及微通道 2 中的不同, 这是微通道 3 中的相对渗透率曲线与微通道 1 和微通道 2 中的相对渗透率曲线有显著差异的原因。

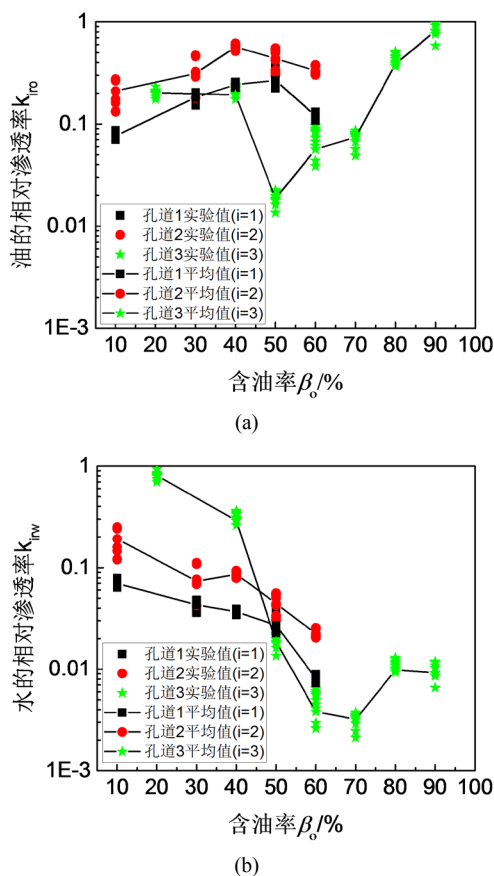


Figure 4. The curve of relative permeability and oil content
图 4. 相对渗透率与含油率的关系曲线

由式(35)和式(36)可知, 体积含油率 β_o 不是影响相对渗透率的唯一因素, 相对渗透率还与两相渗流的总体积流量 Q 以及压降 Δp 有关。鉴于此, 如图4所示, 对于各个微通道, 对应于相同的含油率或者流体饱和度, 会有不同的相对渗透率。

5. 结论

1) 油水两相的相对渗透率与多孔介质的孔隙度无关, 只依赖于微通道中相态分布的几何尺度以及流体饱和度。

2) 对于相同尺度等级的微通道, 油水两相渗流的平均相对渗透率曲线类似; 对于尺度等级明显不同的微通道, 其油水两相渗流的平均相对渗透率曲线有显著差异。

3) 油水两相的相对渗透率曲线之所以存在差异, 是由于相对渗透率不仅与油水两相的饱和度有关, 还与其湿周等参数有关。对应于相同的含油率或饱和度, 油水两相在不同尺度等级的微通道会有不同的湿周, 在相同尺度等级的微通道中会有近似的湿周, 这是引起相对渗透率曲线存在差异的微观因素。

4) 实验结果与渗流单元模型都表明, 即使层流状态下, 油水两相的相对渗透率还与两相流体在微通道中的体积流量、压降等参数有关。

致 谢

感谢国家自然科学基金(11572241)的赞助, 感谢老师的指导以及同学们的帮助, 感谢给予转载和引用权的资料、文献、研究思想和设想的所有者。

参考文献

- [1] Denney, D. (2005) A Low-Permeability Case Study of 5 Years of Continuous Well-Performance Improvement. *Journal of Petroleum Technology*, **57**, 41-42. <https://doi.org/10.2118/0105-0041-JPT>
- [2] Denney, D. (2004) Characterization of Water Injection in Low-Permeability Rock Using Sandstone Micromodels. *Journal of Petroleum Technology*, **56**, 71-72. <https://doi.org/10.2118/0504-0071-JPT>
- [3] Cinar, Y. and Franklin, M. (2005) Measurement of Three-Phase Relative Permeability with IFT Variation. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, **8**, 33-43. <https://doi.org/10.2118/89419-PA>
- [4] 杨悦, 周芳德. 低渗透复杂油藏渗流理论基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2010.
- [5] Alizadeh, A.H. and Piri, M. (2014) Three-Phase Flow in Porousmedia: A Review of Experimental Studies on Relative Permeability. *Reviews of Geophysics*, **52**, 468-521. <https://doi.org/10.1002/2013RG000433>
- [6] Gunde, A., Babadagli, T., Roy, S.S. and Mitra, S.K. (2013) Pore-Scale Interfacial Dynamics and Oil-Water Relative Permeabilities of Capillary Driven Counter-Current Flow in Fractured Porous Media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **103**, 106-114. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.02.005>
- [7] Poate, J., Illangasekare, T., Kazemi, H. and Kee, R. (2015) Pore Scale Phenomena: Frontiers in Energy and Environment. World Scientific Publishing Co Pte Ltd., Singapore. <https://doi.org/10.1142/9305>
- [8] Mahmoudi, S., Mohammadzadeh, O., Hashemi, A. and Kord, S. (2017) Pore-Scale Numerical Modeling of Relative Permeability Curves for CO₂-Oil Fluid System with an Application in Immiscible CO₂ Flooding. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, **7**, 235-249. <https://doi.org/10.1007/s13202-016-0256-4>
- [9] 严宗毅. 低雷诺数流理论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.
- [10] Marle, C.M. (1981) Multiphase Flow in Porous Media. Gulf Publishing Company, Houston.
- [11] 邓英尔, 等. 高等渗流理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [12] Wallis, G.B. (1969) One-Dimensional Two-Phase Flow. McGraw-Hill Inc., New York.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5639，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：apf@hanspub.org