

文章编号: 1001-6112(2007)05-0522-05

粗糙毛细管通道中油水驱替数值模拟与分析

刘长春, 刘石, 王雪瑶

(中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

摘要: 油水运移和聚集研究, 对认识油气藏的成藏规律和指导油气勘探具有重要意义。表面张力是油水运移的重要影响因素, 在不同几何形状的运移通道中, 表面张力可能是驱替的动力或阻力。采用表面规则的突起台阶模拟粗糙元, 使用非定常的 Navier-Stokes 方程和流体体积函数 (VOF) 界面追踪方法, 使用连续表面张力 (CSF) 模型考虑表面张力的影响, 对毛细管通道中的油水驱替进行了数值模拟。计算结果表明, 粗糙元的形状和尺寸是影响油水界面形态和流量的重要因素; 由表面张力驱动的流体通过粗糙元形成的喉道时会发生水相被油相包裹的现象; 在入口压力驱动下, 油水发生分段流动现象。

关键词: 毛细管; 流体体积函数; 连续表面张力; 油水驱替

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

NUMERICAL SIMULATION AND ANALYSIS OF OIL-WATER DISPLACEMENT BEHAVIOR IN ROUGH CAPILLARY CHANNEL

Liu Changchun, Liu Shi, Wang Xueyao

(Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The research on oil-water migration and accumulation plays an important role in understanding reservoir forming regularities, as well as guiding oil and gas exploration. As an important influence factor in oil-water migration, surface tension may act as driving force or resistance of oil-water displacement, depending on the geometric shape differences of the migration channels. A numerical simulation of oil-water displacement in the capillary channel has been made by using the surface regular protuberances for simulating the rough elements, using the unsteady Navier-Stokes equation with volume of fluid (VOF) interface tracking method and the continuum surface force (CSF) model for the surface tension. The results show that the shape and size of the rough element have important effect on the shape of oil-water interface and the mass flow rate; and when driven by surface tension, water phase can be wrapped by oil phase around the throat formed by rough elements, whereas oil may flow separately in water phase when driven by the entrance pressure.

Key word: capillary tube; volume of fluid; continuum surface force; oil-water displacement

油水运移和聚集研究对认识油气藏的成藏规律、指导油气勘探具有重要意义, 是油气地质研究的一个热点。影响油水运移的因素包括流道粗糙度、温度、表面张力、接触角、液体粘性等。此外, 石油在运移中可能呈现扩散相、水溶相、气溶相等相态, 但是以游离相为主。表面张力是油水运移的重要影响因素, 其在不同的接触角和通道几何形状下, 可能是驱替的动力, 也可能是驱替的阻力^[1~3]。数值模拟是研究油水运移机理的重要方法, 但目前公开发表的采用 Navier-Stokes 方程对油水运移进行模拟的

文献相对较少, 对上述问题的研究还十分欠缺。对此, 本文采用规则粗糙突起台阶模拟粗糙元, 从不可压缩流体的 Navier-Stokes 方程出发, 采用 VOF(流体体积函数)模型进行界面追踪^[4], 并利用 CSF(连续表面张力)模型考虑表面张力的影响, 模拟了水平毛细管通道中油水驱替的流动特性。

1 数学模型

1.1 控制方程

假设毛细管通道呈轴对称态, 采用柱坐标对控

收稿日期: 2006-11-22; 修订日期: 2007-08-13。

作者简介: 刘长春(1982-), 男(汉族), 河北邯郸人, 硕士, 主要从事流场数值模拟研究。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2005CB422105)。

制方程进行描述。主场采用无重力不可压缩 Navier—Stokes 控制方程：

$$\frac{\partial \mathbf{u}_r}{\partial r} + \frac{\partial \mathbf{u}_x}{\partial x} + \frac{\mathbf{u}_r}{r} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}_x}{\partial t} + \mathbf{u}_x \frac{\partial \mathbf{u}_x}{\partial x} + \mathbf{u}_r \frac{\partial \mathbf{u}_x}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 \mathbf{u}_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{u}_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{u}_x}{\partial r} \right) + \mathbf{f}_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}_r}{\partial t} + \mathbf{u}_x \frac{\partial \mathbf{u}_r}{\partial x} + \mathbf{u}_r \frac{\partial \mathbf{u}_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 \mathbf{u}_r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{u}_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{u}_r}{\partial r} - \frac{\mathbf{u}_r}{r^2} \right) + \mathbf{f}_r \quad (3)$$

其中： r, x 分别为径向和轴向坐标变量； $\mathbf{u}_r, \mathbf{u}_x$ 为 r 方向和 x 方向的速度分量； p 为压力项； $\mathbf{f}_r, \mathbf{f}_x$ 为 r 方向和 x 方向表征表面张力的体积力项； t 为时间变量； ν 为运动粘度； ρ 为密度。

体积分数满足输运方程：

$$\frac{\partial a_o}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla a_o = 0 \quad (4)$$

其中： a_o 代表油相的体积分数。

根据体积分数，通过以下方程可以求出当地的物理参数 ν, ρ ，公式如下：

$$\nu = a_o \nu_o + (1 - a_o) \nu_w \quad (5)$$

$$\rho = a_o \rho_o + (1 - a_o) \rho_w \quad (6)$$

其中：下标 o, w 分别代表油相和水相。

界面重构采用 Youngs 方法^[5]。

1.2 表面张力模型

根据 CSF 模型^[6]，表面张力通过动量方程 (2)、(3) 中附加体积力项 $\mathbf{f}_x, \mathbf{f}_r$ 来体现，它的形式如下：

$$\mathbf{f}_i = \frac{\rho \sigma \kappa \nabla a_i}{(\rho_o + \rho_w) / 2} \quad i = o, w \quad (7)$$

$$\kappa = -\nabla \cdot \hat{\mathbf{n}} = \frac{1}{|\mathbf{n}|} \left[\left(\frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|} \cdot \nabla \right) |\mathbf{n}| - \nabla \cdot \mathbf{n} \right] \quad (8)$$

其中： κ 为表面曲率； σ 为表面张力； $\hat{\mathbf{n}}$ 为表面单位法向量， $\hat{\mathbf{n}} = \mathbf{n} / |\mathbf{n}|$ ， $\mathbf{n} = \nabla a_o$ 。

壁面接触角 θ_b 的影响按下式计算：

$$\hat{\mathbf{n}} = \hat{\mathbf{n}}_b \cos \theta_b + \hat{\mathbf{t}}_b \sin \theta_b \quad (9)$$

其中： $\hat{\mathbf{n}}_b$ 和 $\hat{\mathbf{t}}_b$ 为壁面法向和切向单位向量。

1.3 计算模型和算法验证

本文使用 Fluent 软件进行数值模拟。通过对毛细管弯月面位置的模拟，验证了该方法对模拟狭长通道中流体运动的适用性。本文在计算中选择毛细管半径为 0.50 mm，高为 15 mm (若选择与

Zhmud 等实验相同的高 50 mm，则会因尺寸比例相差过大而导致计算结果不稳定)，计算介质为二乙醚和空气。其中二乙醚的密度为 710 kg/m³，动力粘度为 0.22 × 10⁻³ Pa · s；空气的密度为 1.225 kg/m³，动力粘度为 0.018 6 × 10⁻³ Pa · s；空气和二乙醚的表面张力为 0.016 7 N/m，接触角为 26°。从图 1 可以看出，在 Zhmud 等^[7]的实验中，随着毛细管长度的增加，弯月面位置曲线振荡趋于缓和。数值计算得到的弯月面位置曲线振荡变化与 Zhmud 等的实验结果^[7]具有相同的趋势，故该数值方法对考虑表面张力作用的狭长通道中流体运动模拟是适用的^[8]。

本文研究的对象是粗糙度对毛细管通道中油水驱替的影响，采用规则突起模拟粗糙元。对实际复杂模型简化后，计算域及具体几何参数如图 2 所示，其中 R_h 控制粗糙元突起高度， θ_h 控制粗糙元

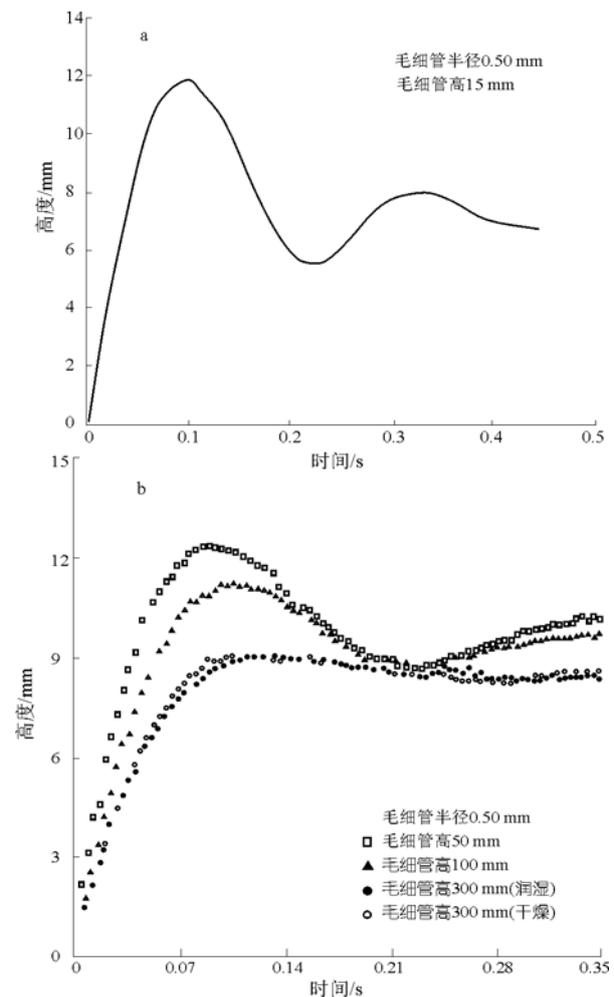


图 1 空气和二乙醚竖直毛细管中形成的弯月面位置随时间的变化曲线

a. 数值计算结果；b. Zhmud 等的实验结果^[7]

Fig. 1 Height of the menisci caused by air and diethylether changes in the capillary tubes

与壁面的夹角。

图2中采用的流体参数为:油相的密度为 838 kg/m^3 ,动力粘度为 $3.47 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$;水相的密度为 1000 kg/m^3 ,动力粘度为 $1.003 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$;油水表面张力为 0.024 N/m ,接触角为 30° ,其中油相为润湿相。初始时管道内油相为左方 1 mm 长的液柱,管道的其余部分则充满了水。由于毛细管通道直径很小,相对于表面张力的作用,重力的影响基本可以忽略,因此本文在计算中不考虑重力的影响。毛细管通道壁面采用无滑移条件,入口和出口为给定压力边界,初始状态为全场静止。时间步长为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}$,其中 $R_h = 0$ 时的网格单元数为 5×10^4 个。

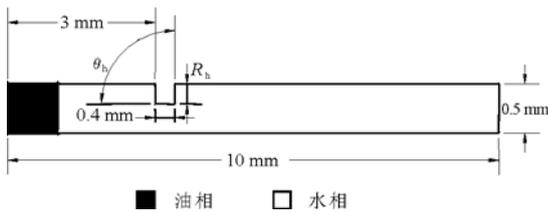


图2 计算区域

Fig. 2 Domain of computation

2 计算结果与分析

2.1 单纯表面张力驱动

在单纯表面张力驱动情形下,毛细管通道中的流动只通过油水之间的表面张力驱动,毛细管通道的入口静压和出口静压采用给定值,且二者大小相等。

图3所示是不同 R_h 下左端入口质量流量随时间的变化曲线图。可以观察到,当不存在粗糙单元即 $R_h = 0$ 时(图3a),入口质量流量随着时间的变化先增加,后减小。这是因为初始阶段表面张力引起的驱动力大于流动阻力,入口质量流量不断增加。随着时间的增加,流体速度不断增加,油相在毛细管通道中所占的份额也不断增加,粘性阻力不断增大,当粘性阻力大于表面张力引起的驱动力时,入口质量流量开始下降。

当 $R_h = 0.10 \text{ mm}$ (图3b)、 $R_h = 0.20 \text{ mm}$ (图3c)时,质量流量首先发生阶跃降低,然后开始增加。因为当润湿性油相开始进入粗糙元构成的喉道(以下简称喉道)时,油水两相界面会发生扭曲(图3c),曲率增大。从式(7)可知,表面张力和界面曲率成正比,故表面张力突增,会引起入口质量流量发生突增现象。当界面运动到喉道末端时,突然进入一个较大的空间,界面形状再次突变,由于无法

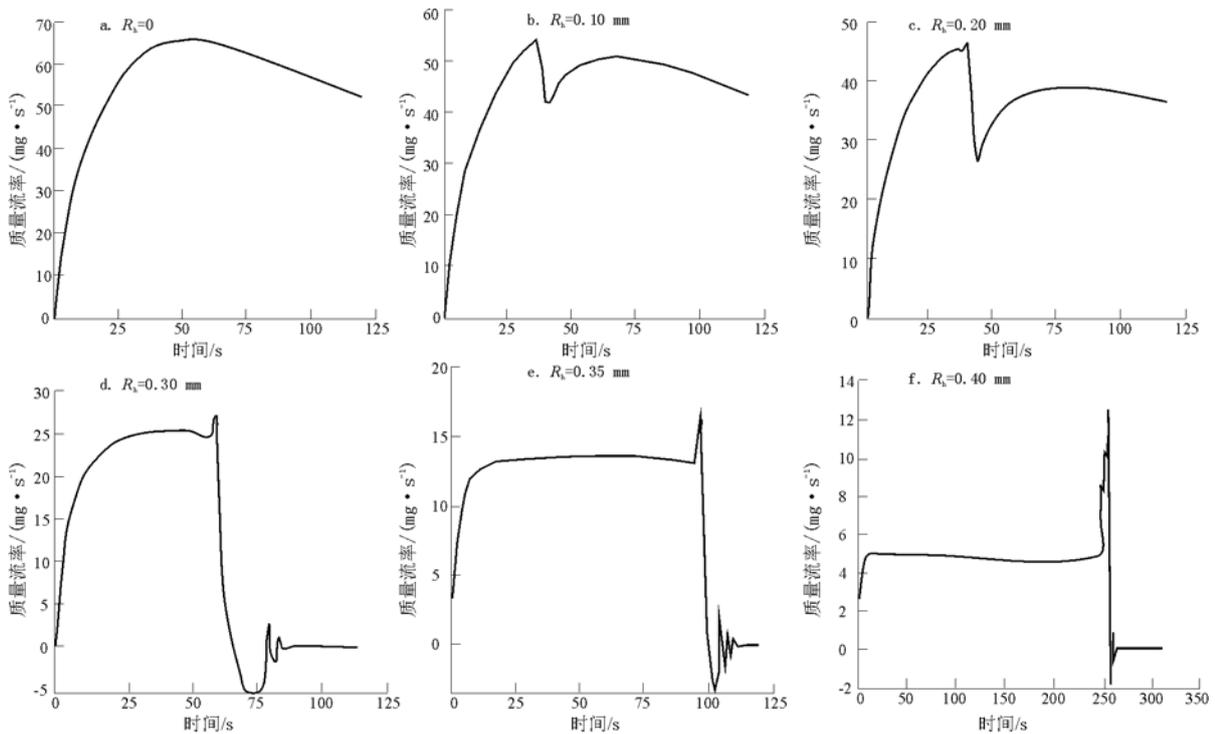


图3 壁面接触角(θ_h)为 90° 时不同粗糙元质量流量

Fig. 3 Mass flow rates of different rough elements when $\theta_h = 90^\circ$

立即附着到新的横向壁面,在流动惯性的作用下,油水界面由凹型(相对油相)转变为凸型,曲率符号发生改变,表面张力由驱动力变为阻力。故流动阻力突然增加,入口质量流量突然减小。随着时间的增加,流体在惯性的作用下,重新附着到横向壁面,界面由凸型恢复为凹型,表面张力产生的驱动力逐渐增大,入口质量流量也随之增加。

当 $R_h = 0.30, 0.35, 0.40$ mm(图 3d, e, f)时,从图中可知入口质量流量会发生阶跃振荡,并且出现油的质量流量反向流动情况,最后稳定在 0,即此后不再有油相流入毛细管通道。分析可知随着 R_h 减小,由喉道末端进入大空间的流体体积相对较小,出口与横向壁面垂直距离增大,仅依靠流体惯性油相无法重新附着到横向壁面上。当速度减小为 0 时,界面为凸型,表面张力反向驱动流体运动,入口质量流量会出现负值;反向运动一段时间后,速度再次减小为 0,界面为凹型,再次发生反向流动。这样往复振荡运动数次后,能量逐渐耗散,最后界面稳定在粗糙元尾端。

从图 4 可以观察到在通过喉道时,水相发生断裂,出现水相被油相包围的现象。分析可知粗糙度是引起间断流动的主要原因,如图 4c 所示。流体进入喉道后,由于流体通道突然变窄,弯月面发生扭曲,其前缘闭合,使水相包围在油相之中(图 4d)。随着时间的推移,在惯性作用下,流体从喉道中流出,封闭的油相前缘重新张开(图 4h),隔离的水相从油相中释放出来,形成连续的水相。在 $R_h = 0.10$ mm 时,因为 R_h 相对较小,通过粗糙喉道时,弯月面虽然会发生弯曲,但是无法闭合,故不会出现水相被包裹在油相中的现象。

从图 3d 知, $R_h = 0.30$ mm, $\theta_h = 90^\circ$ 时,随着时间的增加,入口质量流量发生阶跃振荡后不再有流体流入。从图 5 可知, $R_h = 0.30$ mm, $\theta_h = 120^\circ$ 时,质量流量发生阶跃后会继续增加。因为改变 θ_h 角,会使突起形状变得相对平缓。对斜壁面受到的表面张力进行分解(图 6)可知,水平方向由表面张力产生的总阻力为:

$$f_{Dx} = \pi d \sigma \cdot \cos(\theta_h - \theta_b) \quad (10)$$

其中: d 为圆形通道的直径, σ 为表面张力。

由式(10)可知,随着 θ_h 的增加,界面在水平方向受到的阻力减小,当 $(\theta_h - \theta_b) > 90^\circ$ 时, f_{Dx} 变为负值,转变为流体运动的驱动力。由于粗糙突起形状变化平缓,流体进入喉道时,弯月面形状变化也相对平缓,故计算结果显示在 $\theta_h = 120^\circ$ 时不会出现油相包裹水相的现象。

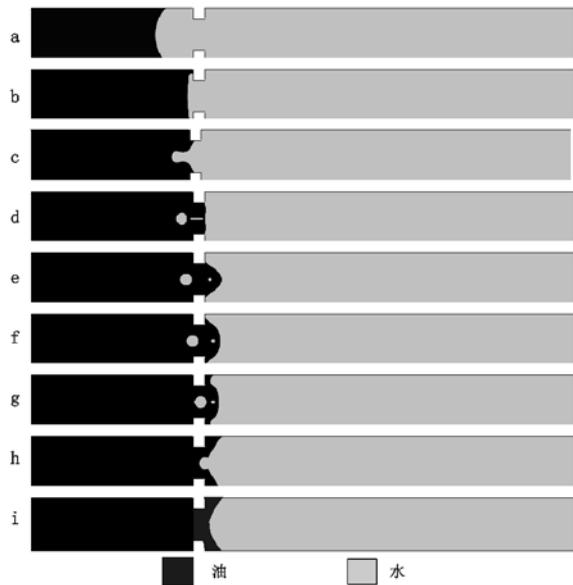


图 4 粗糙元突起高度(R_h)为 0.20 mm 时油水界面随时间的变化

a. $t = 0.003$ s; b. $t = 0.038$ s; c. $t = 0.039$ s; d. $t = 0.040$ s; e. $t = 0.041$ s; f. $t = 0.042$ s; g. $t = 0.043$ s; h. $t = 0.044$ s; i. $t = 0.050$ s

Fig. 4 Changes of oil-water interfaces with time when $R_h = 0.20$ mm

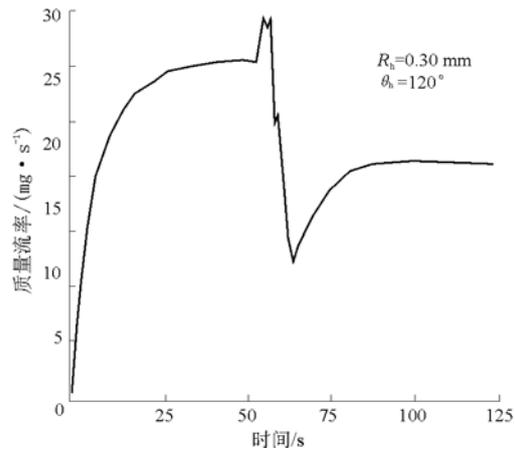


图 5 入口质量流量

Fig. 5 Mass flow rate in the entrance

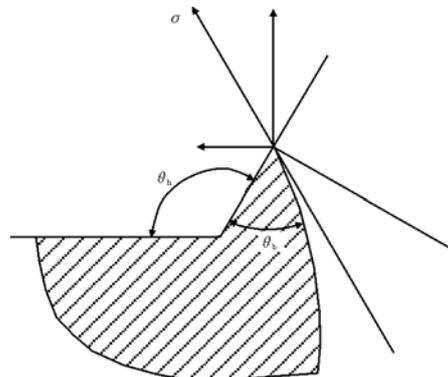


图 6 斜壁面处的表面张力

Fig. 6 Surface tension of the inclined plane

2.2 附加压力驱动

对入口边界和出口边界设置不同的压差,当压差为 300,400,600 Pa 时,都可以观察到类似于图 7 ($P=500$ Pa)中形成的油水分段流动现象,也有学者在实验中观察到类似的现象^[9]。因为在压力和惯性的共同作用下,油相通过喉道后,形成狭长的突起(图 7a,b,c),在表面张力的作用下,和壁面接触的界面向弯月形状发展,突起后端相对其它位置被往后拉(图 7e,f,g),从而把突起拉断。随着时间的增加,在表面张力的作用下,被拉断的突起向球形发展(球体的界面张力能量最低)(图 7h,i)。计算发现,压力差较低($P=200,100,50$ Pa)时,由于驱动力不足,油相通过喉道后无法形成狭长的突起,不会出现油水分段流动的现象。

改变驱动方向,在压力的作用下使水相驱替油相(图 8),不会出现油水分段流动的现象。因为水相是非润湿相,虽然可以形成狭长的突起(图 8b,c),但通过喉道后,并不在壁面处附着,而是被包裹在油相中运动,油相附着在壁面。随着时间的增加,突起会不断增大,但不会被拉断,无法形成分段流动现象。

3 结论

当毛细管通道中存在粗糙突起时,通过管道的流体在表面张力作用下,入口质量流量会发生阶跃变化;当喉道小于一定尺寸时,入口质量流量会发

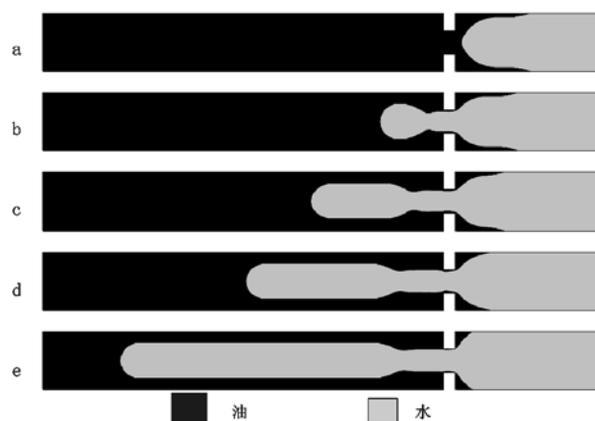


图 8 不同时刻界面形状
压力差 $\Delta P=500$ Pa;右端驱动; $R_h=0.30$ mm。
a. $t=0.020$ s;b. $t=0.025$ s;c. $t=0.030$ s;
d. $t=0.035$ s;e. $t=0.045$ s

Fig. 8 Interface shapes at different time

生阶跃振荡变化,此时单纯表面张力无法驱动流体通过喉道。

在单纯表面张力作用下,流体通过喉道时,弯月面会扭曲闭合,从而产生油相包裹水相的现象;在一定压力驱动下,会形成油水分段运移的现象。

文中油相为润湿相,当设定水相为润湿相时,可以得到相似的结果。由上述结论可知,粗糙度是影响油水驱替的重要因素,在粗糙度的作用下可以产生油水包裹、分段流动现象。

参考文献:

- 李明诚.石油与天然气运移[M].北京:石油工业出版社,2004. 1~350
- 曾溅辉.油气运移机理及物理模拟[M].北京:石油工业出版社,2002. 1~190
- 王志欣.毛细管力是油(气)初次运移的动力吗?[J].石油实验地质,2000,22(3):195~200
- 刘儒勋.数值模拟方法和运动界面追踪[M].合肥:中国科技大学出版社,2001. 1~315
- Youngs D L. Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion[A]. In: Morton K W, Baines M J, eds. Numerical methods for fluid dynamics[C], New York: Academic Press, 1982. 273~285
- Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension[J]. J Comput Phys, 1992, 100: 335~354
- Zhmd B V, Tiberg F, Hallstenson K. Dynamics of capillary rise [J]. Journal Colloid and Interface Science, 2000, 228: 263~269
- 黄伟峰,刘秋生,李勇.存在残余液体的微管道中表面张力驱动流动[J].清华大学学报(自然科学版),2006,46(2): 280~283
- 唐玄,金之钧,杨明慧等.碳酸盐岩裂缝介质中微观二维油水运移聚集物理模拟实验研究[J].地质论评,2006,52(4): 570~576



图 7 不同时刻界面形状

压力差 $\Delta P=500$ Pa; $R_h=0.30$ mm。

a. $t=0.018$ s;b. $t=0.019$ s;c. $t=0.020$ s;d. $t=0.030$ s;e. $t=0.040$ s;f. $t=0.043$ s;g. $t=0.044$ s;h. $t=0.045$ s;i. $t=0.050$ s

Fig. 7 Interface shapes at different time