科学通报 2009 年 第 54 卷 第 7 期: 972 ~ 977
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

润湿性对水在微管和岩芯中流动特性的影响

王斐[①*], 岳湘安[①*], 徐绍良[②], 张立娟[①], 赵仁保[①], 侯吉瑞[①]

① 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室, 提高采收率研究中心, 北京 102249;
② 安中国际石油有限公司, 上海 200060
* 联系人, E-mail: wangfeiran@gmail.com; yxa@cup.edu.cn

2008-08-30 收稿, 2009-01-13 接受
国家自然科学基金(批准号: 50574060)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2005CB221303)资助项目

摘要 实验研究了去离子水在内径为 14.9, 5.03, 2.05 μm 的亲水和憎水微圆管中的流动特性. 结果表明, 去离子水在 14.9 μm 微管中的流动特性与经典 Hagen-Poiseuille(H-P)方程相符; 但随着管径的减小, 去离子水在亲水和憎水微管中的流动特性均偏离经典理论, 其偏离程度受管壁润湿性的显著影响, 并随着雷诺数的减小而增加. 同时, 流体在岩芯中的渗流是其在无数微米量级孔喉中流动的宏观表现, 润湿性对孔喉中微尺度流动的影响将导致岩芯渗流特性的变化. 因此, 研究了盐水在不同润湿性岩芯中的流动, 发现润湿性对岩芯渗流和微尺度流动的影响规律相似.

关键词
微圆管
润湿性
微尺度效应
渗流
毛管束模型

根据微电子机械系统(MEMS)理论, 当流动的特征尺度减小到一定程度, 支配流动的各种影响因素的地位将发生变化, 原来在常规流动中被忽略的作用力(如表面力)将对流动产生明显影响, 使流体流动规律偏离经典流体力学理论.

Papautsky等人[1]研究了水在金属微槽中的流动, 发现流动阻力高于经典理论预测值, 尤其是在低雷诺数时, 阻力增加的现象更加明显, 徐等人[2]的研究结果与此一致. Urbanek等人[3]研究了醇在微槽内(水力直径为 5, 12, 25 μm)的流动, 观测到流动的泊肃叶数(Poiseuille number)高于纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程预测值, 且与流体温度有关. Mala和Li[4]研究了水在熔融硅微管和不锈钢微管中的流动, 发现实验压力梯度高于泊肃叶流(Poiseuille flow)理论的预测值; 但与文献[1, 2]不同的是, 他们认为这种现象随着雷诺数的增加而更加明显, 并指出管壁粗糙度和流态从层流到紊流的提前转捩是出现该现象的原因. Peng等人[5]也认为微通道中会出现流态的提前转捩, 且出现转捩的临界雷诺数和微通道水力直径密切相关. Ye等人[6]则通过一种极性流体模型解释了极性液体分子在微槽内的流动阻力较常规尺度流动增加的现象. Cui等人[7]研究了流体在熔融硅微管中的高压流动(1~30 MPa), 发现实验流动阻力高于经典理论预测值, 且随着压力的增加而显著增加, 并认为黏压关系是出现这种现象的主要原因. 也有一些研究者[8~10]着重考虑了双电层对液体在微通道中流动的影响, 认为双电层引起的电黏效应是流动阻力高于常规预测值的原因.

由于在微尺度流动中壁面和流体的相互作用将对流动规律产生重要影响, 壁面润湿性对微尺度流动的影响也值得关注. Barrat和Bocquet[11]通过分子动力学模拟研究了液体在其不润湿固体表面的滑移, 认为当液体接触角增加到一定程度, 无滑移边界条件在微尺度条件下将不再适用. Wu和Cheng[12]的实验结果表明, 界面润湿性对微槽中水的压降和传热有明显影响, 且随着固-液界面间非润湿性的加强, 流动表观阻力常数会增加. Choi等人[13]研究水在亲水和憎水微槽(深度为 1~2 μm)中的流动, 认为在憎水条件下壁面存在滑移, 而在亲水条件下是否存在滑移由于实验的精度问题还不能确定.

可以看出, 尽管关于液体微尺度流动的研究较多, 但不同研究者的实验条件和方法不尽相同, 得到的结果并不统一; 而润湿性对微尺度流动影响的研究大多针对微槽和平板, 微圆管内不同润湿性条件

引用格式: 王斐, 岳湘安, 徐绍良, 等. 润湿性对水在微管和岩芯中流动特性的影响. 科学通报, 2009, 54(7): 972~977
Wang F, Yue X A, Xu S L, et al. Influence of wettability on flow characteristics of water through microtubes and cores. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0167-6

下微流动的研究相对较少. 本文研究了去离子水在不同润湿性微圆管中的低雷诺数流动特性, 并结合岩芯渗流实验, 说明润湿性对水的微管流动和渗流的影响.

1 装置和方法

1.1 微管实验

(ⅰ) 实验材料. 实验所用微管为熔融硅管(Polymicro Technology Company), 内径分别为 14.9, 5.03, 2.05 μm. 实验流体为去离子水, 其在 25℃下的密度和黏度分别为: 0.99568 g/mL, 0.8665 mPa·s, 分别由 Calculating Digital Density Meter 和 HAAKE- RS600 流变仪测得.

(ⅱ) 实验装置. 装置由三部分组成(图 1): 动力系统、过滤系统、测量系统. 高压氮气瓶提供的高纯氮气经过减压阀流入大容量缓冲罐, 由缓冲罐为测试系统提供动力, 驱替储液罐中实验流体进入实验微管. 实验采用位移法计量流量, 实验微管出口端与流量计量毛细管相连, 毛细管另一端与大气连通, 通过实时图像采集系统记录毛细管内气-液界面的位移, 从而得到实时流量. 为了防止液体挥发的影响, 在毛细管内加一段白油保护段塞.

(ⅲ) 润湿性改变. 实验采用甲基硅油对原本亲水的微圆管内壁进行润湿性改变. 图 2 为通过显微镜观察到的甲基硅油处理前后去离子水在微圆管内接触角的对比, 左图为未处理的亲水管壁, 右图为经甲基硅油处理过的管壁, 其中黑色部分为空气, 白色部分为去离子水. 可见, 经甲基硅油处理后, 壁面的润湿性发生了很大的变化, 由亲水变为憎水.

(ⅳ) 误差分析. (1) 微管内径测量误差: 用扫描电子显微镜(OxfordS-360)对微管进行内径测量(图 3), 所得内径分别为 2.05, 5.03, 14.9 μm, 由仪器测量精度引起的不确定性分别为± 1.5%, ± 1.1%, ± 0.67%.

(2) 压力损失和毛管力引起的误差: 测量系统由连接管线, 储液罐, 实验微管, 流量计量毛管组成(图 4, 管道中灰色填充部分为液体, 白色部分为气体), 这些组件的沿程阻力导致的压力损失分别为 P_1, P_2, P_3, P_4, 而组件连接处管径的突然变大或缩小产生的局部压力损失分别为ΔP_1, ΔP_2, ΔP_3, 常规管道中层流的沿程和局部压力损失计算公式如下:

$$P_i = f_i \frac{L_i}{D_i}\frac{\rho}{2}v_i^2, \quad i = 2, 3, 4, \tag{1}$$

$$\Delta P_2 = 0.5\times\frac{\rho}{2}v_3^2, \tag{2}$$

$$\Delta P_3 = \left(1-\frac{D_3^2}{D_4^2}\right)^2\frac{\rho}{2}v_3^2. \tag{3}$$

由以上公式计算出由连接组件的沿程和局部压力损失所引起的误差(这里忽略气体的沿程和局部压力损失),

$$\text{Error} = \frac{\Delta P_2 + \Delta P_3 + P_2 + P_4}{P_3}\times 100\%. \tag{4}$$

以 2.05 μm 微管第一个数据点($Re = 2.6\times10^{-4}$)为例, 将各组件相关参数代入(1)~(4)式得 Error = 0.0006%. 可见, 由于测量微管与连接组件之间巨大的管径差别和微管自身巨大的长径比, 测量系统中由连接组件所引起的沿程和局部压力损失在本实验条件下可以忽略.

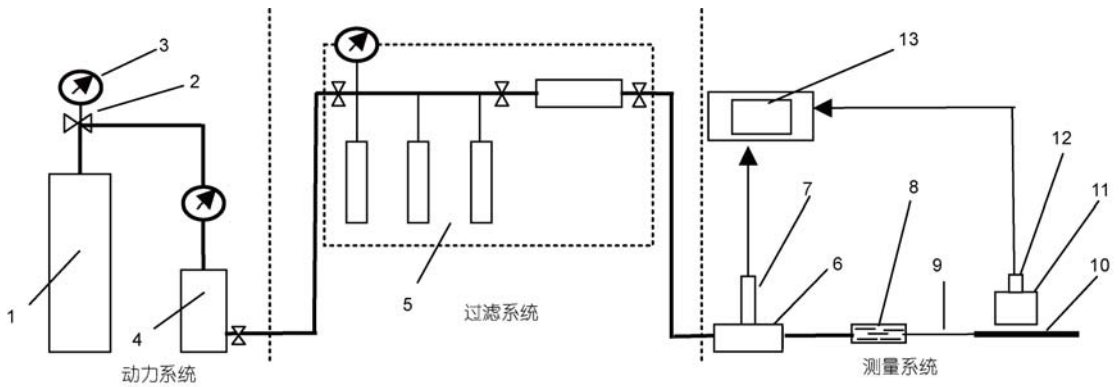


图 1 微管实验装置

1, 高压氮气瓶; 2, 阀门; 3, 压力表; 4, 缓冲罐; 5, 气体过滤装置; 6, 三通管; 7, 压力温度记录; 8, 储液罐; 9, 实验微管; 10, 计量毛管; 11, 显微镜; 12, 图像采集系统; 13, 计算机

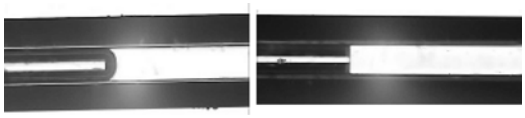


图 2 水在亲水/憎水管内的接触角 (100 μm)

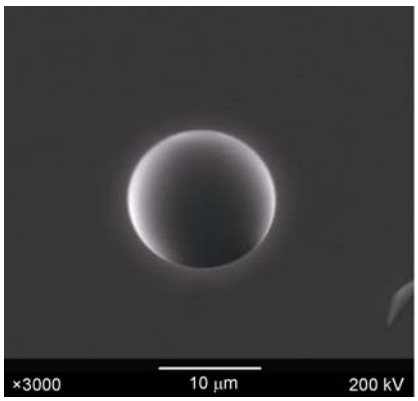


图 3 端面扫描电子显微镜图

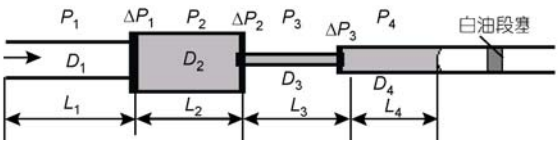


图 4 测量系统连接示意图

同时, 在毛管力作用下, 微管的自吸将影响流量计量. 25℃时去离子水表面张力σ = 71.92 mN/m, 流量计量毛管的最小管径 r = 320 μm, 则根据毛管力公式

$$\Delta P_c = 2\sigma\cos\theta / r . \tag{5}$$

产生的毛管力ΔP_c = 0.899 kPa (假设液面与管壁接触角θ为 0°), 由此引起的压力误差为 3.6%. 因此本文在实验数据处理中对由毛管力引起的误差进行了校正; 计量毛管末端有白油保护段塞, 由于毛管管壁亲水, 白油段塞两端毛管力非常小, 且这对毛管力可以相互抵消, 因而忽略其影响.

(3) 黏度和压力测量误差: 实验采用整体控温法, 实验温度 25℃. 温度波动为±0.5℃, 由此引起工作液黏度的变化大约为±1.2%. 实验所用传感器精度为 0.25%.

(4) 系统误差: 对于牛顿流体在圆管中的层流, 由 H-P 方程计算得到流量:

$$Q_{\mathrm{HP}} = \frac{\pi D_h^{\,4}\Delta P}{128\mu L}, \tag{6}$$

式中D_h为微管内径, μ为流体黏度, ΔP为实验压差, L为微管长度.

而由毛管位移法测得实测流量Q_{exp},

$$Q_{\mathrm{exp}} = \frac{\pi d^2 l}{4t}, \tag{7}$$

式中d为流量计量毛管内径, l为液面位移, t为测试时间.

定义 Q*为 H-P 方程计算流量与实测流量之比, 即

$$Q^* = \frac{Q_{\mathrm{exp}}}{Q_{HP}} . \tag{8}$$

则由误差传递式(9)可得实验系统误差(表 1).

$$\frac{u_{Q^*}}{Q^*} = \sqrt{\frac{16}{D^2}u_D^{\,2} + \frac{u_{\Delta P}^{\,2}}{P^2} + \frac{u_\mu^{\,2}}{\mu^2} + \frac{u_L^{\,2}}{L^2} + \frac{4}{d^2}u_d^{\,2} + \frac{u_l^{\,2}}{l^2} + \frac{u_t^{\,2}}{t^2}} \tag{9}$$

1.2 岩芯实验

(ⅰ) 实验材料. 实验所用岩芯均为人造砂岩亲水岩芯, 是在同一个均质大岩芯柱上的相邻位置钻取, 以保证岩芯具有相似的孔隙结构. 选择一块岩芯用甲基硅油进行润湿性处理, 处理后气测其渗透率, 如得到的渗透率与未处理的某块岩芯相同, 则将这两块岩芯划为一组, 备用. 考虑到岩芯的水敏性, 渗流实验所用液体为$MgCl_2\cdot 6H_2O$, $CaCl_2$, NaCl 配制的盐水, 总矿化度 19334 mg/L, 测得其黏度为 1.002 mPa·s;

(ⅱ) 润湿性改变. 从人造岩芯中切割出正方形岩芯薄片, 用界面张力仪(SCAT, Dataphysics)测量盐水在薄片表面的接触角, 测得前进角与后退角分别为 9.758°, 9.682°. 用甲基硅油对岩芯进行处理, 再次测量盐水在其薄片表面的前进角和后退角, 二者分别变为 82.561°, 81.130°, 可见甲基硅油处理后, 岩芯由强亲水变为中性润湿.

表 1 微管实验的系统误差

管径/μm	u_D(%)	$u_{\Delta P}$(%)	u_μ(%)	u_L(%)	u_d(%)	u_l(%)	u_t(%)	u_{Q^*}(%)
2.05	±1.5	±0.25	±1.2	±0.1	±0.3	±1.1	±0.17	6.25
5.03	±1.1	±0.25	±1.2	±0.1	±0.3	±1.1	±0.17	4.70
14.9	±0.67	±0.25	±1.2	±0.1	±0.3	±1.1	±0.17	3.20

岩芯渗流实验的装置和方法与常规液体渗流实验相同，这里不再赘述.

2 结果与讨论

（ⅰ）去离子水在微管中的流动. 实验研究了2.05, 5.03, 14.9 μm 亲水和憎水微管中去离子水的流动特性，实验结果如图 5 所示.

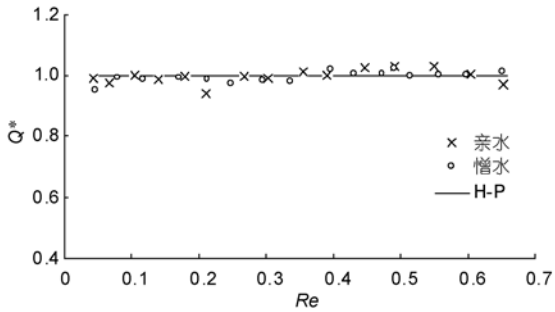


图 5 流量比 Q^* 随雷诺数 *Re* 的变化(14.9 μm)

由图可知，在此管径中，在两种润湿性下去离子水的流动规律都与经典理论相符.

而当管径减小到 2.05, 5.03 μm 时，去离子水在亲水和憎水微管中的流动规律均偏离经典理论，Q^*值均小于 1(图 6 和 7)，尤其是在实验雷诺数较低时；且相同管径中，润湿性不同，同一雷诺数下的 Q^*值也不同. 以 2.05 μm 管为例：当管壁亲水时，在实验

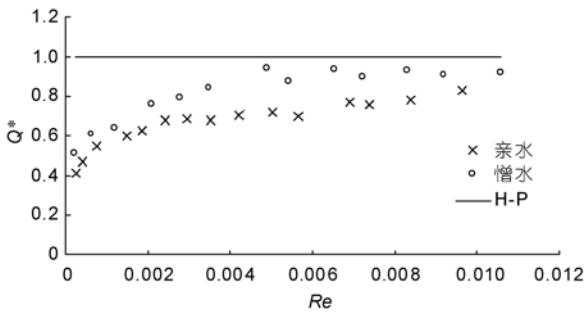


图 6 流量比 Q^*随雷诺数 *Re* 的变化(2.05 μm)

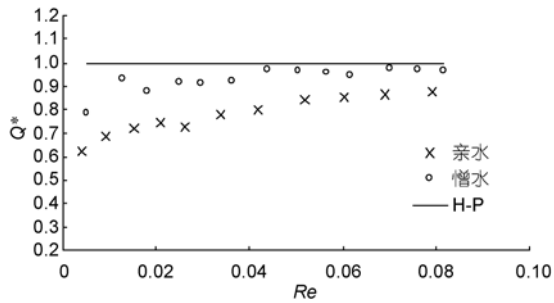


图 7 流量比 Q^*随雷诺数 *Re* 的变化(5.03 μm)

所达到的最小雷诺数下，Q^*出现最小值 0.41，而随着雷诺数的增加，Q^*逐渐增加，当实验雷诺数达到最大时(0.0096)，Q^*也达到最大值 0.83. 当管壁憎水时，Q^*随雷诺数的变化规律与亲水管相似，但 Q^*均高于相同雷诺数下其在亲水管中数值. 当管径增大到 5.03 μm，Q^*在亲水管中的最小值与最大值分别为 0.62, 0.88，在憎水管中的最小值与最大值分别为 0.93, 0.96. 可见，去离子水在 2.05, 5.03 μm 管中的流动规律明显偏离经典理论，表现为实验流量明显低于 H-P 方程计算流量，且亲水管中流量明显低于憎水管中流量. 同时，流动偏离经典理论的程度还与实验雷诺数有关，随雷诺数的增大而减弱.

由以上实验现象可知，润湿性对去离子水在微管中的流动特性有明显影响. 这和不同润湿性管壁与壁面附近流体之间的相互作用强弱有关. 根据吸附理论，由于固-液分子之间van der waals力的作用，当液体流经固体表面时，在固体表面将形成一个特殊的壁面流体层，该层内液体的密度和结构将有别与体相流体[14~16]，它存在径向的密度梯度，越靠近壁面密度越高. 同时，由于壁面与液体分子、液体分子与液体分子之间相互作用力的累积效果，该壁面流体层可具有相当可观的厚度：Rene和Wayner[17]利用图像分析干涉仪研究纯水在熔融石英表面扩展的弯月面，得到的吸附水膜厚度可大于 0.1 μm；可见微管中液体流动应该考虑壁面流体层的影响. 对于去离子水在熔融硅管中的流动，当管壁亲水时，管壁的Si原子对管壁附近的水分子产生强烈吸引，在壁面形成一个特殊的水层，即壁面流体层，该层内的液体密度和黏度均大于体相流体，且越靠近壁面，液体与管壁的作用力就越强，其密度和黏度越大. 当流动的特征尺度减小到一定程度(如本实验中的 2.05, 5.03 μm)，这个壁面流体层对流动的影响将不能忽略，其高于体相流体的密度和黏度将使流动表现出高于经典理论的流动阻力，直观的表现为实测流量减少. 而随着雷诺数的增加，壁面剪切力增加，逐渐破坏该壁面流体层并削弱其对流动的影响，从而使Q^*值逐渐增大. 然而在本实验中，最大雷诺数仅为 0.08，相应的最大壁面剪切力仅为 43 Pa，这样低的壁面剪切力对壁面流体层的破坏是有限的，所以随着雷诺数的增加，Q^*的增加趋势逐渐变缓，且其值始终小于 1. 对于憎水微管，由于甲基硅油分子膜的隔离作用使壁面与水分子的相互作用弱于亲水微管，其对流动的影响也

相对较弱，所以相同雷诺数下憎水微管的Q^*高于亲水微管. 而憎水微管中的Q^*仍都小于 1，说明此时壁面和流体间的相互作用仍不可忽略. 同时，双电层对微尺度流动的影响也值得关注[8~10]，双电层的电黏作用也可能是导致流动阻力增加的一个原因. 也有文献[18,19]研究了壁面粗糙度对微尺度流动的影响，而本实验采用的微管为熔融硅管，厂家给出的管壁说明为水力学光滑，这也被Cui等人[7]通过原子力显微镜观察所证实，所以粗糙度对流动的影响可以忽略. 还需要指出的是，在本实验条件下(低雷诺数，低壁面剪切力)，未观测到液体滑移现象；

(ⅱ) 润湿性对渗流的影响. 油藏中流体的流动通道一般在微米量级，流体渗流是其在无数个油藏孔喉中流动的宏观表现. 润湿性对微尺度流动的影响在渗流中也应该反映出来，而改变油藏岩石润湿性也是提高驱油效率的重要手段之一. 为此我们通过毛管束模型与人造岩芯渗流实验研究了润湿性对水渗流的影响.

根据直管毛管束模型，假设多孔介质是由 N 根管径和长度完全相同的微管组成的微管束，则该多孔介质的渗透率为:

$$K=\frac{Q\mu L}{A\Delta P}=\frac{NQ_{\exp}\mu L}{NA_{\text{tube}}\Delta P}\Phi, \tag{10}$$

式中 A_{tube} 为微管横截面积; Φ 为孔隙度; $Q_{\exp}$ 为单微管中流量. 将去离子水在 2.05 μm 亲水和憎水微管中流动的实验数据代入(10)式，并取 $\Phi=25\%$(在下面进行的人造岩芯水渗流实验中，我们计算得到所用岩芯孔隙度为 25%)，得到去离子水在考虑润湿性和微尺度效应的毛管束模型中的视渗透率(图 8). 由图 8 可知，在考虑了去离子水单毛管流动的壁面润湿性和微尺度效应影响后，由等直径毛管束模型得到的渗透率不再是一个常数，而是随着壁面润湿性和渗流压力梯度而改变的视渗透率，且在相同压力梯度下，壁面亲水时的视渗透率低于憎水时的值. 而在两种润湿性条件下视渗透率都是随着压力梯度的增加而增大，且增加趋势逐渐变缓.

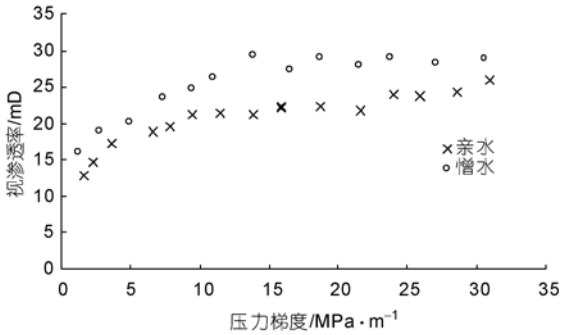


图 8 视渗透率随压力梯度的变化(毛管束模型)

结合上述分析，进行了盐水在润湿性不同，但孔隙结构相似，气测渗透率相同的岩芯中的渗流实验(图 9). 可以看出，润湿性对盐水在岩芯中的渗流特性同样有显著影响. 在相同压力梯度下，水在亲水岩芯中的视渗透率低于中性润湿岩芯；且在所有岩芯实验中，视渗透率均随着压力梯度的增加而逐渐增大，即随着渗流速度的增加，壁面剪切力增大，孔喉壁面流体层对流动的影响逐渐减弱. 此结果与考虑润湿性和微尺度效应的毛管束模型结果类似(图 8)，与微管实验结果也是一致的(图 6 和 7).

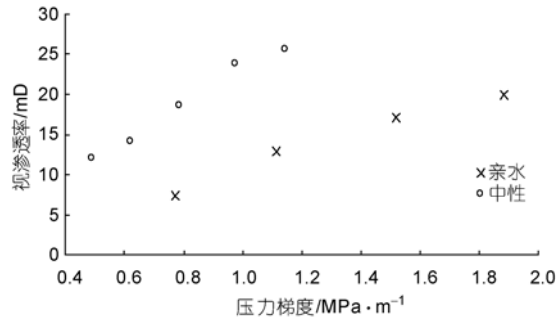


图 9 视渗透率随压力梯度的变化(人造岩芯)

3 结论

(ⅰ) 去离子水在管径为 2.05，5.03 μm 的亲水和憎水微管中的流动规律均偏离经典流体力学理论，其实测流量明显低于 H-P 方程计算值，尤其是在较低雷诺数下；在同一微管中，实测流量与计算流量之比 Q^* 随着雷诺数的增加而增大，而增加趋势逐渐变缓. 在 14.9 μm 微管中去离子水在不同润湿性下的流动规律均与经典理论相符；

(ⅱ) 在相同管径(2.05，5.03 μm)中，去离子水在亲水管中的流量明显低于其在憎水管中流量，即润湿性对去离子水在微圆管中的流动有显著影响；

(ⅲ) 研究了盐水在亲水和中性润湿岩芯中的渗流，发现在岩芯气测渗透率相同、孔隙结构相似的条件下，水在中性润湿岩芯中的视渗透率明显高于其在亲水岩芯中的值. 且在所有岩芯中，视渗透率均是随着压力梯度的增加而增加，但增加趋势逐渐变缓，这与微管实验结果是一致的.

参考文献

1 Papautsky I, Brazzle J, Ameel T, et al. Laminar fluid behavior in microchannels using micropolar fluid theory. Sensor Actuator Phys, 1999, 73: 101—108[doi]

2 徐绍良, 岳湘安, 侯吉瑞. 去离子水在微圆管中流动特性的实验研究. 科学通报, 2007, 52(1): 120—124

3 Urbanek W, Zemel J N, Bau H. An investigation of the temperature dependence of Poiseuille numbers in microchannel flow. J Micromech Microeng, 1993, 3: 206—208[doi]

4 Mala G M, Li D Q. Flow characteristics of water in microtubes. Int J Heat Fluid Flow, 1999, 20(2): 142—148[doi]

5 Peng X F, Peterson G P, Wang B X. Frictional flow characteristics of water flowing through rectangular microchannels. Exp Heat Tran, 1994, 7: 249—265

6 Ye S J, Zhu K Q, Wang W. Laminar flow of micropolar fluid in rectangular microchannels. Acta Mech Sin, 2006, 22: 403—408[doi]

7 Cui H H, Silber-Li Z H, Zhu S N. Flow characteristics of liquids in microtubes driven by a high pressure. Phys Fluid, 2004, 6(5): 1803—1810[doi]

8 Yang C, Li D Q. Analysis of electrokinetic effects on the liquid flow in rectangular microchannels. Colloid Surface Physicochem Eng Aspect, 1998, 143: 339—353[doi]

9 Ng E Y K, Poh S T. Modeling of electric double layer effects through pressure-driver microchannel flows. Comput Model Eng Sci, 2002, 3(3): 315—365

10 Ren C L, Li D Q. Electroviscous effects on pressure-driven flow of dilute electrolyte solutions in small microchannels. J Colloid Interface Sci, 2004. 274 (1): 319—330[doi]

11 Barrat J L, Bocquet L. Large slip effect at a nonwetting fluid-solid interface. Phys Rev Lett, 1999, 82(23): 4671—4674[doi]

12 Wu H, Cheng P. An experimental study of convective heat transfer in silicon microchannels with different surface conditions. Int J Heat Mass Tran, 2003, 46(14): 2547—2556[doi]

13 Choi C H, Westin K J A, Breuer K S. Apparent slip flows in hydrophilic and hydrophobic microchannels. Phys Fluid, 2003, 15(10): 2897—2902[doi]

14 Nagayama G, Cheng P. Effects of interface wettability on microscale flow by molecular dynamics simulation. Int J Heat Mass Tran, 2004, 47: 501—513[doi]

15 Alexander P, Michael G. Water-graphite interaction and behavior of water near the graphite surface. J Phys Chem B, 2004, 108(4): 1357—1364[doi]

16 Thomas J A, McGaughey A J H. Effect of surface wettability on liquid density, structure, and diffusion near a solid surface. J Chem Phys, 2007, 126: 034707[doi]

17 Rene R M, Wayner P C. Aqueous wetting films on fused quartz. J Colloid Interface Sci, 1999, 214(2): 156—169[doi]

18 Silva G, Leal N, Semiao V. Micro-PIV and CFD characterization of flows in a microchannel: velocity profiles, surface roughness and Poiseuille numbers. Int J Heat Fluid Flow, 2008, 29: 1211—1220[doi]

19 Wang H, Wang Y. Influence of three-dimensional wall roughness on the laminar flow in microtube. Int J Heat Fluid Flow, 2007, 28: 220—228[doi]