

HPAM 稀溶液在微圆管中流动特性的实验研究¹⁾

岳湘安^{*,2)} 王 斐[†] 唐 鸣[†] 张 羽^{**} 王雯靓^{††}

^{*}(中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室,石油工程学院,北京 102249)

[†](川庆钻探工程有限公司地质勘探开发研究院,成都 610051)

^{**}(大庆油田有限责任公司第三采油厂,大庆 163113)

^{††}(川庆钻探工程有限公司川西钻探公司,成都 610000)

摘要 实验研究了部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)稀溶液(水溶液)在内径为 10.1~325 μm 石英微管中的高剪切速率($1\,215\sim 23\,120\,\text{s}^{-1}$)流动。结果表明,聚合物溶液在管径小于 100 μm 微管中的流动具有明显的微尺度效应,实测流速高于由同种溶液在常规管径圆管中的流动规律所预测的流速。实测流速与预测流速之间的偏离程度与管径和剪切速率有关:相同剪切速率下,管径越小,偏离越明显;在小管径微管中,偏离随剪切速率的增加而减小,而当管径超过 30.7 μm 后,偏离不再随剪切速率的变化而改变。

关键词 微尺度流动,衰竭层,表观滑移,聚合物迁移,流变特性

中图分类号: O37 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2011)01-0090-07

引 言

人们在实验中发现,聚合物溶液在一些毛细管和多孔介质中流动的实际流量大于流变仪预测值^[1-8],即存在所谓的“表观滑移现象”。由于表观滑移现象对色谱分析、润滑剂研究、微/纳流控芯片研制和聚合物驱油等都具有重要意义,它一直是人们比较关心的问题。目前对该现象普遍的解释是在壁面附近存在一个聚合物浓度低于体相浓度的衰竭层,当流动的特征尺度(如管径)减小一定程度,该衰竭层对聚合物溶液流动的影响不能忽略,使流动的阻力偏小,实际流量偏大。该衰竭层的存在最近已经被实验直接证实^[9-11]。

Chauveteau 等^[3,12]和 Sorbie 等^[13]用位阻效应来解释衰竭层的形成,认为壁面限制了其附近聚合物分子的构型自由度,迫使其向远离壁面的方向迁移;而 Müller-Mohnssen 等^[7]认为壁面与聚电解质之间的静电作用可以部分解释衰竭层的存在。但 Aubert 等^[2],Cohen 等^[5]和 Dutta 等^[14]研究表明,位阻或静电排斥效应引起的衰竭层厚度不会大于分子的水力学直径,这样有限的厚度不能解释很多明显的表观滑移现象,尤其是聚合物分子大小

和流动特征尺度差别较大的情况。而热力学观点认为^[5],在不均匀的剪切场(如管流中),壁面处的剪切速率较高,分子所受的拉伸作用也较强,从而壁面到流线中心出现一个空间自由能梯度,使壁面处分子向流线中心迁移,使壁面附近出现了一个浓度衰竭层。该理论认为在均一流中聚合物是没有迁移的,这与 Fang 等^[11]和 Dill 等^[15]的实验结果违背。

Aubert 等^[2]从动力学的观点解释衰竭层的形成,认为不均一的速度梯度场是聚合物分子迁移并形成衰竭层的原因。该理论可以解释在流线为曲线的流动中聚合物分子向内侧的迁移现象,但对于流线为直线的流动,该理论认为聚合物的迁移只能沿流线方向,且溶液表观黏度会随着管径的减小而增加,这与实验结果违背^[1,5,7]。Brunn 等^[16-17]在珠簧模型中考虑了聚合物分子内的水动力学相互作用,模拟结果表明直线流中可以出现穿越流线的聚合物迁移,但迁移是沿靠近壁面的方向。以上的研究都没有考虑壁面对聚合物分子的水动力学相互作用,最近 Jendreck 等^[18],Ma 等^[19],Butler 等^[20]和 Usta 等^[21]在考虑了聚合物分子间水动力学相互作用的同时,还考虑了壁面和聚合物分子间的水动力学相互作用,认为在压力驱动流中,聚合物将向离

2009-11-09 收到第 1 稿, 2009-12-21 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金资助项目(50574060)。

2) E-mail: yxa@cup.edu.cn

开壁面的方向迁移, 壁面和聚合物分子间的水动力学相互作用对聚合物的迁移起决定作用, 这与 Fang 等^[11]的实验结果定性符合。

可以看出, 对聚合物溶液表观滑移现象的认识还并不一致, 其发展和完善有待对更多的、不同实验条件下的实验现象进行研究和分析。而以往的实验研究(如拖曳流实验)多在较低剪切速率下进行, 且以往聚合物溶液在毛细管中的流动实验所采用的管径相对较大, 管径范围较窄, 也没有给出针对某种溶液的表观滑移现象发生的管径界限。本文研究了高剪切速率下 ($1\,215\sim 23\,120\text{ s}^{-1}$), 不同浓度聚合物稀溶液在管径范围为 $10.1\sim 325\mu\text{m}$ 的熔融石英微管内的流动规律, 分析了表观滑移随管径的变化规

律, 并确定了所研究的聚合物溶液在微管中出现表观滑移的管径范围。

1 实验

1.1 实验装置与方法

实验装置如图 1 所示。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, 由缓冲罐提供稳定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管相连, 计量毛管另一端与大气连通。在计量毛管液体中注入一段气泡, 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。实验采用整体控温, 实验温度 25°C 。

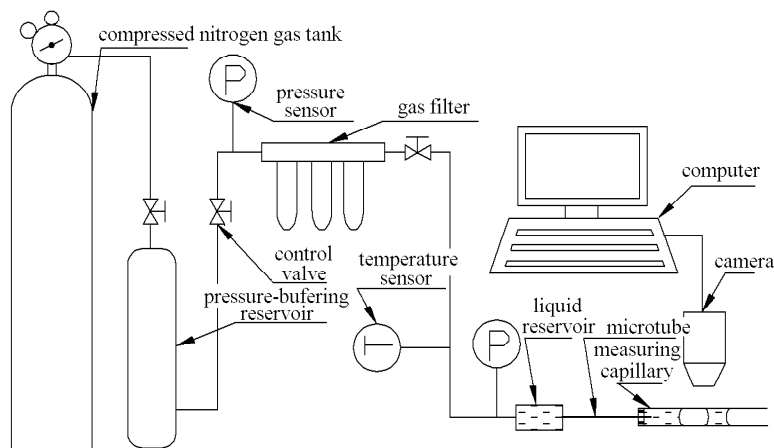


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental setup

1.2 实验材料

实验所用微圆管为进口熔融石英管, 由扫描电镜测得内径分别为 $10.1\mu\text{m}$, $20.1\mu\text{m}$, $30.7\mu\text{m}$, $51.2\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $153\mu\text{m}$, $325\mu\text{m}$, 管长为 80mm 。实验所用聚合物为部分水解聚丙烯酰胺 (HPAM), 重均分子量为 $2.4\times 10^6\text{ g/mol}$, 用去离子水配制成浓度分别为 500 mg/l , 300 mg/l , 100 mg/l 的稀溶液。用流变仪 (HAAKE RS600) 测得为典型的幂律型流体 (中等剪切速率范围内), 流变曲线见图 2。用动态光散射法 (美国 Wyatt 公司 DAWN HELEOS 多角度激光光散射仪——QELS 附件单机) 测得聚合物分子平均水动力学半径为 $0.11\mu\text{m}$ 。

1.3 误差分析

(1) 微管内径误差: 用扫描电镜 (OxfordS-360) 对微管进行内径测量。管径越小, 测量误差越大。所用扫描电镜放大倍数在 $10\,000$ 倍以内时, 其分辨率

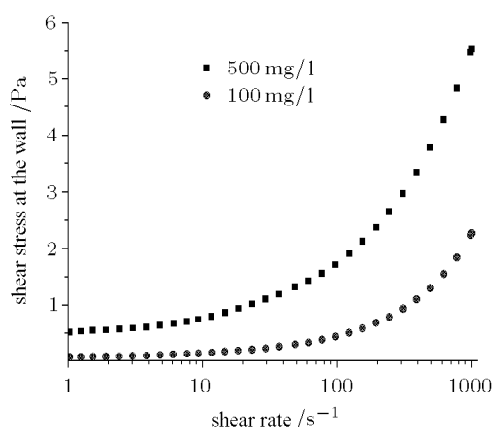


图 2 流变仪中 HPAM 溶液流变特性

Fig.2 Rheological behaviors of HPAM (measured by rheometer)

约为 4 nm , 但管径大小的读数是由图片得到的, 这与图片的灰度和像素有关。以规格为 $10\mu\text{m}$ 的微管为

例, 实验中对同一截面进行了 5 次测量, 得到的平均值为 $10.1 \mu\text{m}$ (图 3), 和平均值的最大偏差为 $0.08 \mu\text{m}$, 因此认为测量误差为 $\pm 0.80\%$.

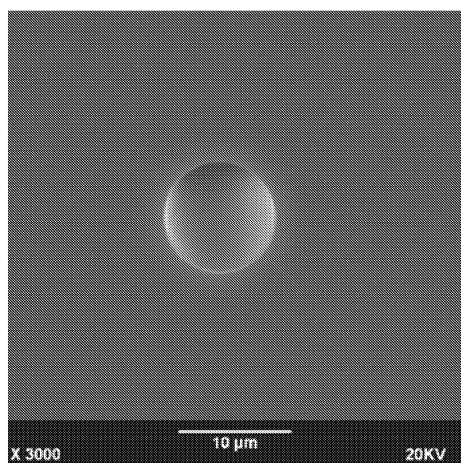


图 3 $10.1 \mu\text{m}$ 微管端面电镜扫描

Fig.3 Cross-section of a fused silica microtube ($10.1 \mu\text{m}$)

(2) 压力误差: 在计量毛管中, 应分析毛管力对压力计量可能造成的影响. 25°C 时去离子水表面张力 $\sigma = 71.92 \text{ mN/m}$ (这里以去离子水的表面张力代替聚合物溶液的表面张力), 计量毛管的最小管径 $r = 0.5 \text{ mm}$, 根据毛管力公式

$$\Delta P_c = 2\sigma \cos \theta / r \quad (1)$$

产生的毛管力 $\Delta P_c = 0.29 \text{ kPa}$ (假设液面与管壁接触角 θ 为 0°), 由此引起的压力误差不超 0.5% .

同时, 测量系统由储液罐、实验微管、流量计量毛管组成 (图 4), 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 , 而组件连接处管径的突然缩小或变大产生的局部压力损失分别为 $\Delta P_1, \Delta P_2$. 这里用常规管道中牛顿流体层流的沿程和局部压力损失计算方法来估算聚合物溶液流动的压力损失, 具体公式如下

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

$$\Delta P_1 = 0.5 \times \frac{\rho}{2} v_2^2 \quad (3)$$

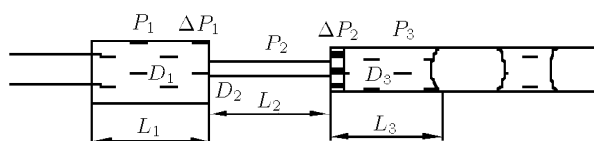


图 4 测量系统连接示意图

Fig.4 Schematic of the measurement system

$$\Delta P_2 = \left(1 - \frac{D_2^2}{D_3^2}\right)^2 \frac{\rho}{2} v_2^2 \quad (4)$$

通过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)

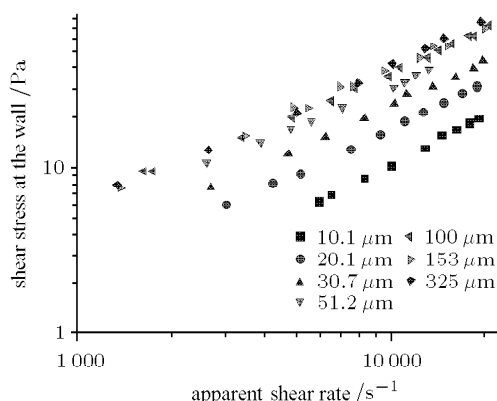
$$\text{Error} = \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2 + P_1 + P_3}{P_2} \times 100\% \quad (5)$$

以 $10.1 \mu\text{m}$ 微管数据点为例, 将各组件相关参数代入式 (2)~(5) 得 Error 远小于 0.001% . 可见, 由于测量微管与连接组件之间巨大的管径差别, 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. 而由于微管自身巨大的长径比 ($250 \sim 8000$), 进出口效应在本实验条件下可以忽略.

2 结果与讨论

2.1 实验数据处理

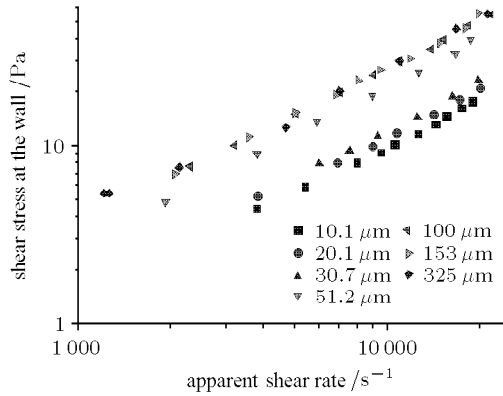
本研究进行的管流实验中所得的实验数据为流量 (截面平均流速) 和压差 (或压力梯度). 研究 HPAM 溶液在微圆管中的微尺度效应, 实验数据处理所用的表征参数不应该依赖于任何常规尺度下特定的流变模型, 而只包含流动的动力学参数和流场几何参数等客观参数. 本文综合分析大量实验数据发现, HPAM 溶液在微管中的流动阻力 (或壁面剪应力) 与由微管中截面平均流速和管径定义的视剪切速率具有很好的相关性 (如图 5). 因此, 本文以视剪切速率作为实验数据处理的表征参数之一. 壁面



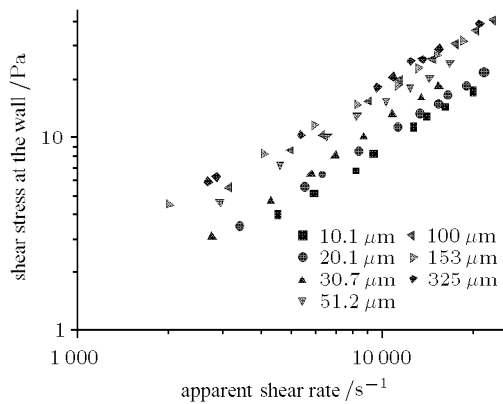
(a) HPAM-500 mg/l

图 5 不同管径中 τ_w 随 $\dot{\gamma}_a$ 的变化

Fig.5 The relationship between τ_w and $\dot{\gamma}_a$



(b) HPAM-300 mg/l



(c) HPAM-100 mg/l

图 5 不同管径中 τ_w 随 $\dot{\gamma}_a$ 的变化 (续)Fig.5 The relationship between τ_w and $\dot{\gamma}_a$ (continued)

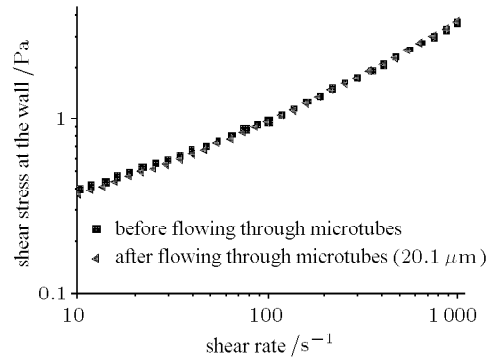
剪切应力 τ_w 与视剪切速率 $\dot{\gamma}_a$ 的计算公式如下

$$\tau_w = \frac{\Delta P D}{4L} \quad (6)$$

$$\dot{\gamma}_a = \frac{8\bar{V}}{D} \quad (7)$$

其中, ΔP 为流动压差, D 为管径, L 为管长, $\bar{V}$ 为管中的平均流速.

由于实验的壁面视剪切速率较高 ($1215 \sim 23120 \text{ s}^{-1}$), 剪切降解可能对实验结果产生影响. 因此, 研究了同种聚合物溶液在高剪切速率下 (20000 s^{-1}) 流经 $20.1 \mu\text{m}$ 微管前后, 在流变仪中的流变曲线的变化. 图 6 为 300 mg/l 浓度溶液的实验结果, 可以看出原液和微管流出液在流变仪中流变曲线略有差别, 但这种差别随着剪切速率的增加而迅速减弱. 所以, 对于本实验, 微管中剪切降解的影响可以忽略.

图 6 HPAM 溶液 (300 mg/l) 流经 $20.1 \mu\text{m}$ 微管前后流变特性的对比Fig.6 Rheological behaviors of HPAM (300 mg/l) before and after flowing through microtubes ($20.1 \mu\text{m}$)

同时, 常规尺度下雷诺数 (Re) 的定义及黏度 (μ) 的计算公式如下

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} \quad (8)$$

$$\mu = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_a} \quad (9)$$

其中, ρ 为聚合物溶液密度.

将实验数据代入以上两式计算可得, 在 $10.1 \mu\text{m}$ 和 $325 \mu\text{m}$ 管中最大雷诺数分别为 11.02 和 150.13. 所以, 如果按照常规尺度下流态理论来判断, 本实验中聚合物溶液的流动状态为层流.

2.2 微尺度流动效应的表征及分析

由图 5 可知, 当管径减小到一定程度 (小于 $100 \mu\text{m}$), 聚合物溶液在微管中的流动特性与管径有关, 具有明显的微尺度效应. 为了更客观地表征 HPAM 溶液的微尺度流动效应, 本文以常规尺度流动的实验数据作为比较基准 (而不以某个特定的流变模型作为基准), 用微尺度流动实验结果与此基准的偏离程度反映微尺度效应的强弱.

通过对 HPAM 溶液在直径 $10.1 \mu\text{m}$ 至 $325 \mu\text{m}$ 圆管中流动实验数据的分析发现, 其壁面剪应力与视剪切速率满足式 (10) 所示的经验关系

$$\tau_w = A \left(\frac{8\bar{V}}{D} \right)^B \quad (10)$$

其中, A, B 为实验得到的常数, 不同的 HPAM 溶液其值不一样.

由上式得到

$$\bar{V} = \frac{D}{8} \left(\frac{\tau_w}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (11)$$

根据常规尺度实验结果所得的 A, B 值和式 (11) 可以推算微小管径中同种 HPAM 溶液在相同压力梯度下的平均流速. 如果当管径减小到一定尺度, 推算值与实测值出现较大偏差, 则是微尺度效应作用的结果. 因此, 本文定义一个表征微尺度效应的无量纲参数 V^*

$$V^* = \frac{\bar{V}_{\text{exp}}}{\bar{V}_{\text{theo}}} \quad (12)$$

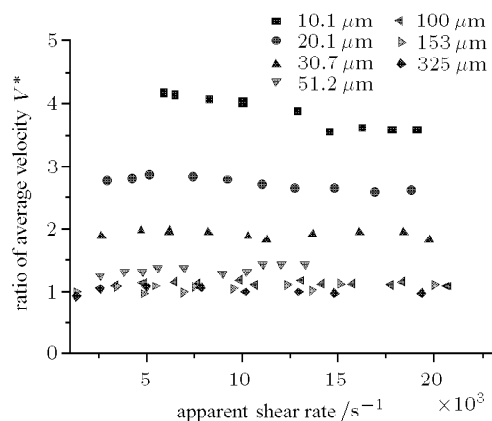
其中, $\bar{V}_{\text{exp}}$ 为实测平均流速, $\bar{V}_{\text{theo}}$ 为相同压力梯度下由常规尺度流变数据 (无微尺度效应) 计算得到的预测平均流速.

本实验所用最大管径为 $325 \mu\text{m}$, 该管径已经达到常规毛细管黏度计的直径或旋转流变仪的夹缝宽度范围. 因此选用 $325 \mu\text{m}$ 微管中的流动数据作为常规尺度流动数据 (无微尺度效应). 于是有

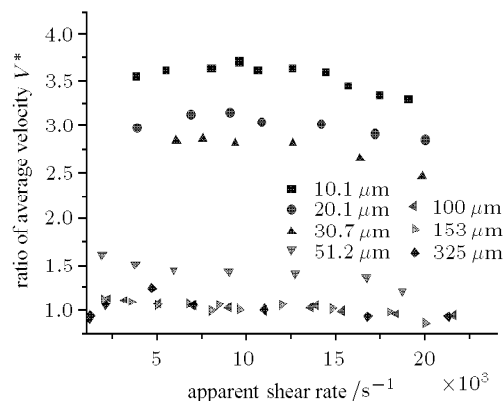
$$\bar{V}_{\text{theo}} = \left(\frac{\tau_w}{A_{325}} \right)^{\frac{1}{B_{325}}} \times \frac{D}{8} \quad (13)$$

其中, A_{325}, B_{325} 为 $325 \mu\text{m}$ 管中实验数据得到的 A, B 值.

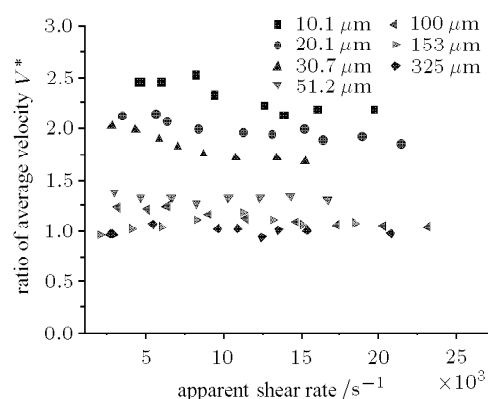
由此得到各管径中 V^* 随剪切速率的变化关系 (图 7). 由图可知, 3 种聚合物溶液在小管径微管中的实际流速均大于预测值, 即均出现明显的表观滑移. 当管径大于 $100 \mu\text{m}$ 时, V^* 值均接近于 1, 此时微尺度效应 (衰竭层) 对流动的影响可以忽略; 但当管径小于 $100 \mu\text{m}$ 时, V^* 值均大于 1, 并且相同剪切速率下, 管径越小, V^* 值越大, $10.1 \mu\text{m}$ 微管中的 V^* 值最大可达 4.19; 对于同一管径, V^* 随着剪切速率的增加而减小, 而当管径大于 $30.7 \mu\text{m}$, V^* 随剪切速率的变化不再明显.



(a) HPAM-500 mg/l



(b) HPAM-300 mg/l



(c) HPAM-100 mg/l

图 7 不同管径微管中 V^* 随 $\dot{\gamma}_a$ 的变化

Fig.7 The relationship between V^* and $\dot{\gamma}_a$

实验所用聚合物分子的平均水动力学半径为 $0.11 \mu\text{m}$, 即由位阻或静电排斥效应引起的衰竭层厚度不会大于 $0.22 \mu\text{m}$; 在 $10.1 \mu\text{m}$ 微管中聚合物分子水动力学半径与微管半径之比为 0.022, 而 $10.1 \mu\text{m}$ 微管中实际流速与预测流速之比最高可达 4.19, 因此位阻或静电排斥效应不能解释本实验如此明显的表观滑移现象. 根据 Jendreck 等^[18] 和 Butler 等^[20] 的分析, 壁面和聚合物分子间的水动力学相互作用是聚合物迁移并形成浓度衰竭层的决定因素. 且剪切速率越大, 壁面与聚合物分子间的水动力学相互作用越强, 衰竭层厚度越大, 这与 Ausserre 等^[22] 和 Chen 等^[23] 的实验结果定性一致, 这也可以部分解释本实验条件下 (高剪切速率下) 会出现如此明显的表观滑移. 而由图 7 可以看出, 当微管管径在 $30.7 \mu\text{m}$ 以内时, 相同微管中, 随着剪切速率的增加, V^* 是减小的. 因此, 高剪切速率下聚合物溶液在微小空间中流动的微尺度效应机理还有待深入研究. 同时, 本文结果表明 HPAM 稀溶液在 $100 \mu\text{m}$ 以

上管径的毛管中流动时就不再有微尺度效应, 而文献 [24] 对浓度为 4700 mg/L 的高分子絮凝剂 (Separan AP-30) 在不锈钢毛管中的流动表明, 当毛管的直径为 266 μm 时, 实际流量较预测流量仍高出 50%; 对比文献 [1](聚氯乙烯水溶液)、文献 [25](黄原胶水溶液) 和文献 [26](聚丙烯酰胺水溶液) 的实验结果也可以看出, 不同溶液在不同实验条件下, 出现微尺度效应的管径范围和微尺度效应对流动的影响程度是不一样的, 可见微尺度效应与管径、聚合物分子性质、溶液浓度、剪切速率等因素有关。

3 结 论

通过研究浓度为 500 mg/l, 300 mg/l, 1000 mg/l 的 HPAM 水溶液在熔融石英微管中的高剪切速率 (1215~23120 s^{-1}) 流动, 得到如下结论:

(1) 聚合物稀溶液在内径小于 100 μm 微管中的流动特性和管径有关, 存在微尺度流动效应, 管径越小, 微尺度流动效应越强; 认为这种微尺度效应是由壁面聚合物浓度衰竭层引起, 当流动管径大于 100 μm , 该衰竭层对流动的影响在本实验中可以忽略;

(2) 在相同壁面视剪切速率下, 聚合物溶液的实测流速高于常规尺度下的预测流速, 二者的比值 V^* 随管径的减小而增加, 其最大值可达 4.19;

(3) 当管径在 30.7 μm 以内时, 同一微管中 V^* 随着剪切速率的增加而减小, 而管径大于 30.7 μm 后, V^* 不再随剪切速率的改变而明显变化, 这种现象产生的机理还有待深入研究。

参 考 文 献

- Kalashnikov VN, Vlasov SA. On scale-dependent effect in laminar flow of dilute polymer solution in tubes. *Rheol Acta*, 1978, 17(3): 296-302
- Aubert JH, Tirrell M. Effective viscosity of dilute polymer solutions near confining boundaries. *J Chem Phys*, 1982, 77(7): 553-561
- Chauveteau G. Rodlike polymer solution flow through fine pores: influence of pore size on rheological behavior. *J Rheol*, 1982, 26(2): 111-142
- Cohen Y, Metzner AB. Adsorption effects in the flow of polymer solutions through capillaries. *Macromolecules*, 1982, 15(5): 1425-1429
- Cohen Y, Metzner AB. An analysis of apparent slip flow of polymer solutions. *Rheol Acta*, 1986, 25(1): 28-35
- Omari A, Moan M, Chauveteau G. Wall effects in the flow of flexible polymer solutions through small pores. *Rheol Acta*, 1989, 28(6): 520-526
- Müller-Mohnssen H, Weiss D, Tippe A. Concentration dependent changes of apparent slip in polymer solution flow. *Rheol Acta*, 1990, 34(2): 223-244
- Sorbie KS, Huang Y. Rheological and transport effects in the flow of low-concentration Xanthan solution through porous media. *J Colloid Interface Sci*, 1991, 145(1): 74-89
- Li L, Hu H, Larson RG. DNA molecular configurations in flows near adsorbing and nonadsorbing surfaces. *Rheol Acta*, 2004, 44(1): 38-46
- Fang L, Hsieh CC, Larson RG. Molecular imaging of shear-induced polymer migration in dilute solutions near a surface. *Macromolecules*, 2007, 40(23): 8490-8499
- Fang L, Larson RG. Concentration dependence of shear-induced polymer migration in DNA solutions near a surface. *Macromolecules*, 2007, 40(24): 8784-8787
- Chauveteau G, Tirrell M, Omari A. Concentration dependence of the effective viscosity of polymer solutions in small pores with repulsive or attractive walls. *J Colloid Interface Sci*, 1984, 100(1): 41-54
- Sorbie KS. Depleted layer effects in polymer flow through porous media I. Single capillary calculations. *J Colloid Interface Sci*, 1990, 139(2): 299-314
- Dutta A, Mashelkar RA. On slip effect in free coating of non-Newtonian fluids. *Rheol Acta*, 1982, 21(1): 52-61
- Dill KA, Zimm BH. A rheological separator for very large DNA molecules. *Nucleic Acids Res*, 1979, 7(3): 735-749
- Brunn PO. Polymer migration phenomena based on the general bead-spring model for flexible polymers. *J Chem Phys*, 1984, 80(11): 5821-5826
- Brunn PO, Chi S. Macromolecules in nonhomogeneous flow fields: a general study for dumbbell model. *Rheol Acta*, 1984, 23(2): 163-171
- Jendrejack RM, Schwartz DC, de Pablo JJ, et al. Shear-induced migration in flowing polymer solutions: Simulation of long-chain DNA in microchannels. *J Chem Phys*, 2004, 120(13): 2513-2529
- Ma H, Graham MD. Theory of shear-induced migration in dilute polymer solutions near solid boundaries. *Phys Fluid*, 2005, 17(8): 083103
- Butler JE, Usta OB, Kekre R, et al. Kinetic theory of a confined polymer driven by an external force and pressure-driven flow. *Phys Fluid*, 2007, 19(11): 113101
- Usta OB, Butler JE, et al. Transverse migration of a confined polymer driven by an external force. *Phys Rev Lett*, 2007, 98(9): 098301
- Ausserre D, Edward J, Lecourtier J, et al. Hydrodynamic thickening of depletion layers in colloidal solutions. *Europhys Lett*, 1991, 14(1): 33-38
- Chen YL, Graham MD, de Pablo JJ, et al. DNA molecules in microfluidic oscillatory flow. *Macromolecules*, 2005, 38(15): 6680-6687
- Cohen Y, Metzner AB. Apparent slip flow of polymer solutions. *J Rheol*, 1985, 29(1): 67-102
- Perez-Gonzalez J, de Vargas L, Tejero G. Flow development of Xanthan solutions in capillary rheometers. *Rheol*

Acta, 1992, 31(1): 83-93

26 Müller-Mohnssen H, Lobl HP, Schauerte W. Direct deter-

mination of apparent slip for a ducted flow of polyacrylamide solutions. *J Rheol*, 1987, 31(4): 323-336

(责任编辑: 刘俊丽 刘 丽)

EXPERIMENTAL STUDY ON FLOW CHARACTERISTICS OF POLYMER SOLUTIONS IN MICROTUBES¹⁾

Yue Xiang^{*,2)} Wang Fei[†] Tang Ming[†] Zhang Yu^{**} Wang Wenliang^{††}

^{*}(College of Petroleum Engineering, MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

[†](Research Institute of Geological Exploration and Development, Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Chengdu 610051, China)

^{**}(The 3rd Oil Production Factory, Daqing Oil Field Company Limited, Daqing 163113, China)

^{††}(Chuanxi Drilling and Exploration Company, Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Chengdu 610000, China)

Abstract The high shear rate flow ($1215\sim 23120\text{ s}^{-1}$) characteristics of the partially hydrolyzed polyacrylamide (HPAM) in silica micro-tubes with diameters in the range of $10.1\sim 325\text{ }\mu\text{m}$ were investigated experimentally. It is shown that the effect of the microtube is obvious in microtubes with diameters less than $100\text{ }\mu\text{m}$. The experimental average velocity is higher than expected which is the flow of the same solution in general-sized tubes. In addition, the discrepancy between the experimental and the expected average velocities is influenced by the diameter and the shear rate. Under the same shear rate the smaller the diameter of the microtube is, the more obvious the discrepancy is. In microtubes the discrepancy decreases as the shear rate, however, if the diameters beyond $30.7\text{ }\mu\text{m}$, the discrepancy hardly varies with the shear rate any more.

Key words microflow, depleted layer, apparent slippage, polymer migration, rheology behavior

Received 9 November 2009, revised 21 December 2009.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (50574060).

2) E-mail: yxa@cup.edu.cn