

# 表面张力对 PEO 稀溶液粘度行为的影响<sup>\*</sup>

张士诚<sup>a, b</sup>, 徐小云<sup>b</sup>, 杨海洋<sup>b\*\*</sup>, 张 劲<sup>a</sup>, 朱平平<sup>b</sup>, 何平笙<sup>b</sup>

( a. 石油大学石油天然气工程学院, 北京 102249; b. 中国科学技术大学高分子科学与工程系, 合肥 230026 )

**摘 要:** 测定了不同分子量聚氧化乙烯( PEO )在水和苯溶剂中的粘度, 发现在低浓度区 PEO 水溶液的比浓粘度出现负偏离, PEO 苯溶液比浓粘度与浓度之间依旧满足线性关系. 表面张力测定结果表明, PEO 分子显著降低了水的表面张力, 而苯的表面张力则不受影响. PEO 水溶液和纯溶剂水表面张力的不同干扰了高分子溶液和溶剂在粘度计中流过时间的测量, 导致低浓度区 PEO 水溶液比浓粘度出现负偏离. 利用 PEO 水溶液和水表面张力测定结果, 结合乌式粘度计的几何尺寸, 定量分析了 PEO 水溶液和纯溶剂水表面张力的差异对粘度测量结果的影响, 计算结果与实验结果基本相符. 如果用 PEO 水溶液流过时间对浓度作图的外推值  $t_0^*$  计算相对粘度, 可以完全消除 PEO 水溶液和水表面张力差异对粘度测量的影响.

**关键词:** 表面张力; 附加压强; 高分子溶液; 比浓粘度

中图分类号: O631.4 文献标识码: A

## Effects of the Surface Tension upon the Viscosity Behavior of Dilute PEO Solutions<sup>\*</sup>

Zhang Shicheng<sup>a, b</sup>, Xu Xiaoyun<sup>b</sup>, Yang Haiyang<sup>b\*\*</sup>, Zhang Jing<sup>a</sup>, Zhu Pingping<sup>b</sup>, He Pingsheng<sup>b</sup>

( a. College of Petroleum and Natural Gas Engineering, University of Petroleum, Beijing 102249;

b. Department of Polymer Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026 )

**Abstract** The viscosity behavior of poly(ethylene oxide) (PEO) with different molecular weights in the water and benzene was determined respectively. It was noted that the reduced viscosity of PEO in the water deviated negatively from the linear relationship at lower concentrations in the reduced viscosity versus concentration plot. On the other hand, the reduced viscosity of PEO in benzene increased linearly with concentration even at lower concentrations. The surface tension measurements indicated that PEO could reduce the surface tension of water considerably but had no effect on the surface tension of benzene. The influence of the surface tension upon the viscosity behavior of polymer solution was notable, especially when the surface tension between the polymer solution and the pure solvent was significant. By measuring the surface tension of water and aqueous PEO solution, together with the geometric parameter of the viscometer, the influence of the surface tension upon the measurement of the flowing time could be studied quantitatively. The calculations were consistent with experimental results approximately. If  $t_0^*$  was employed to determine the viscosity of polymer solution, the influence of the surface tension upon the viscosity behavior of polymer solution could be counteracted completely and the reduced viscosity of PEO in water increased linearly with concentration just the same as PEO in benzene.

<sup>\*</sup> Project supported by the Natural Science Foundation of Anhui (00046310) and the National Foundation of 973 (2002CB211709).

<sup>\*\*</sup> Corresponding author, E-mail: yhy@ustc.edu.cn Received 26 December 2002; in final form 17 September 2003.

**Key word** Surface tension , Additional pressure , Polymer solution , Reduced viscosity

## 1 引言

近年来,极稀高分子溶液粘度的测定和分析再次引起人们的广泛关注<sup>[1-10]</sup>. 越来越多的研究结果表明,高分子溶液比浓粘度在低浓度区出现的异常行为与高分子溶液性质本身无关,而是来自于各种因素对高分子溶液粘度测定结果干扰所致. 利用高分子溶液流过时间  $t$  测定之前和之后纯溶剂在乌式粘度计中的流过时间  $t_0$  和  $t_0'$  之间的差异,以及  $t_0$  和  $t_0'$  与理想条件下纯溶剂流过时间  $t_0^*$  (高分子溶液流过时间  $t$  对浓度作图外推到浓度等于零时的值) 之间的不同,可以有效地揭示低浓度区高分子溶液异常粘度行为的起源. 实验结果表明,高分子在毛细管管壁上的吸附不仅会减小毛细管的有效管径<sup>[6,8,9]</sup>,而且可能会使得毛细管的表面性质产生显著改变<sup>[7,10]</sup>. 如果高分子在毛细管管壁上的吸附仅仅是减小毛细管有效管径,则通过将高分子溶液粘度确定方法由  $t/t_0$  改为  $t/t_0'$  就可以完全消除高分子吸附层对粘度测定结果的影响<sup>[6,8,9]</sup>. 如果高分子在毛细管管壁上的吸附显著改变了毛细管表面性质,情况将更加复杂. 毛细管表面性质改变不仅可能使流体在毛细管中的流动由粘性流动 (viscous flow) 变成滑流 (slip flow)<sup>[2]</sup>,而且会显著改变溶液中高分子与粘度计毛细管管壁之间的相互作用<sup>[7,10]</sup>,最终干扰高分子溶液粘度测量结果. 如果将高分子溶液粘度的确定方法由  $t/t_0'$  再进一步改为  $t/t_0^*$ ,就可以完全消除毛细管表面性质改变对粘度测定结果的影响. 聚乙烯基吡咯烷酮 (PVP) 水溶液粘度测定的结果完全证实了这一点<sup>[7]</sup>. 本工作将系统测定不同分子量聚氧化乙烯 (PEO) 在水和苯溶剂中的粘度,探讨高分子溶液和纯溶剂表面张力的差异对低浓度区高分子溶液比浓粘度的影响. 非常有趣的是,用经过改进的粘度确定方法 ( $t/t_0^*$ ) 依旧可以校正低浓度区 PEO 水溶液异常的粘度行为.

## 2 实验

### 2.1 仪器及药品

Ubbelohde 式粘度计,毛细管直径为 0.38 mm,恒温水槽、秒表 (0.01 s).

聚氧化乙烯 (PEO) 为 Polysciences Inc. 商业产品,其重均分子量分别为  $1.0 \times 10^5$ 、 $3.0 \times 10^5$  和

$9.0 \times 10^5$ . 重蒸蒸馏水和 PEO 水溶液的表面张力由 DSA-10MKZ 表面张力仪 (KRÜSS GmbH, Germany) 测定,接触角由 TY-82 型接触角测定仪 (承德,中国) 测定. 苯为分析纯试剂.

### 2.2 溶液的配置

称取一定质量的 PEO 样品 (准确至 0.1 mg), 溶解后用 2 号玻芯漏斗滤入容量瓶中,再用少量溶剂将瓶中和漏斗中的聚合物洗至容量瓶中,共 3 次. 将容量瓶置于恒温水槽中,稀释至刻度.

### 2.3 纯溶剂和高分子溶液流过时间的测定

移取 10 mL 经过玻芯漏斗过滤的纯溶剂至粘度计中,恒温 10 min,然后测定纯溶剂的流过时间  $t_0$ . 将粘度计从恒温水槽中取出,倒出溶剂,烘干后,用移液管从容量瓶中准确移取 10 mL 溶液至粘度计中,用体积稀释法测定不同浓度时高分子溶液的流过时间  $t$ . 当粘度计中高分子溶液的体积数达到 50 mL 时,将溶液倒出,用纯溶剂将粘度计清洗 3~5 次,再次测定纯溶剂的流过时间  $t_0'$ .

## 3 结果与讨论

### 3.1 高分子溶液相对粘度的确定方法

利用 Ubbelohde 式粘度计确定高分子溶液粘度时,通常首先需要测定纯溶剂的流过时间  $t_0$ ,然后烘干粘度计,用体积稀释法测定不同浓度高分子溶液的流过时间  $t$ . 根据 Poiseuille 方程,高分子溶液和纯溶剂的粘度  $\eta$  和  $\eta_0$  可以按下式进行计算<sup>[11,12]</sup>:

$$\eta = \frac{\pi h g R^4 \rho t}{8 l V} - m \frac{\rho V}{8 \pi l t} \quad (1)$$

$$\eta_0 = \frac{\pi h g R^4 \rho_0 t_0}{8 l V} - m \frac{\rho_0 V}{8 \pi l t_0} \quad (2)$$

如果纯溶剂的流过时间大于 100 s,动能校正项 (方程右边第二项) 可以忽略不计<sup>[11]</sup>. 当浓度比较低时,高分子溶液和纯溶剂密度的比值  $\rho/\rho_0$  近似等于 1,因此,方程 (1) 和 (2) 联立得到高分子溶液相对粘度的计算式<sup>[11]</sup>:

$$\eta_r = t/t_0 \quad (3)$$

Öhm 认为在 高分子溶液流过时间测量过程中溶液中的高分子会吸附在毛细管管壁上,导致毛细管有效管径减小<sup>[13]</sup>. 为了进一步证实这一想法,杨海洋等提出在测量高分子溶液流过时间以后用纯溶剂将粘度计清洗 3~5 次,再次测定纯溶剂的流过

时间  $t_0'$ 。如果  $t_0'$  比  $t_0$  长, 并且不随测量次数的增加而改变, 说明高分子确实稳固吸附在毛细管管壁上。聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 和聚乙烯醇 (PVA) 稀溶液粘度测定结果完全证实了这一点<sup>[6,8]</sup>。显然, 高分子在毛细管管壁上的吸附会干扰高分子溶液流过时间的测量。假定毛细管管壁上高分子吸附层厚度为  $b$ , 则高分子溶液和纯溶剂的粘度  $\eta$  和  $\eta_0$  应该按以下式进行计算:

$$\eta = \frac{\pi h g (R - b)^4 \rho t}{8 l V} - m \frac{\rho V}{8 \pi l t} \quad (4)$$

$$\eta_0 = \frac{\pi h g (R - b)^4 \rho_0 t_0'}{8 l V} - m \frac{\rho_0 V}{8 \pi l t_0'} \quad (5)$$

方程 (4) 和 (5) 联立得到:

$$\eta_r = t/t_0' \quad (6)$$

如果高分子在毛细管管壁上的吸附仅仅是减小了毛细管的有效管径, 则用式 (6) 计算高分子溶液相对粘度可以完全消除高分子在毛细管管壁上的吸附对粘度测定结果的影响<sup>[6,8,9]</sup>。

### 3.2 PEO 水溶液粘度行为及毛细管管壁上 PEO 吸附层的表征

图 1 为 30℃ 时不同分子量聚氧化乙烯 (PEO) 水溶液的比浓粘度对浓度作图, 空心点和实心点为分别按式 (3) 和 (6) 计算。从图 1 可以看出, 在极低浓度区高分子溶液的比浓粘度出现了负偏离, 与

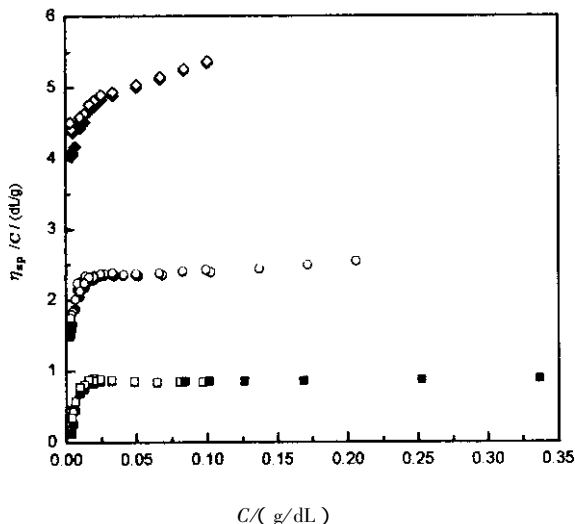


图 1 30℃ 时不同分子量 PEO 水溶液的比浓粘度对浓度作图

Fig. 1 The plot of the reduced viscosity vs. concentration for PEO in aqueous solutions at 30℃

$\eta_r = t/t_0'$ : ■  $9.0 \times 10^5$ ; ●  $3.0 \times 10^5$ ; ◆  $1.0 \times 10^5$ ;  
 $\eta_r = t/t_0$ : □  $9.0 \times 10^5$ ; ○  $3.0 \times 10^5$ ; ◇  $1.0 \times 10^5$ .

Öhrn 的实验结果以及 PMMA 和 PVA 稀溶液粘度测定结果完全相反<sup>[6,8,13]</sup>, 说明低浓度区 PEO 水溶液比浓粘度出现的负偏离是不能用高分子在毛细管管壁上吸附导致毛细管有效管径减小来加以解释的, 但是这并不否定 PEO 分子在粘度测量过程中会吸附在毛细管管壁上。从表 1 可以看出, PEO 水溶液流过时间  $t$  测定之后纯溶剂的流过时间  $t_0'$  要大于 PEO 水溶液流过时间  $t$  测定之前纯溶剂的流过时间  $t_0$ , 这正好说明 PEO 分子在粘度测量时会吸附到毛

表 1 30℃ 时不同分子量 PEO 水溶液的  $t_0$ 、 $t_0'$  和  $t_0^*$

Table 1  $t_0$ ,  $t_0'$  and  $t_0^*$  for PEO with different molecular weights in aqueous solutions at 30℃

Molecular weight	$t_0/s$	$t_0'/s$	$t_0^*/s$
$1.0 \times 10^5$	239.30	239.50	238.66
$3.0 \times 10^5$	239.30	239.51	238.62
$9.0 \times 10^5$	239.30	239.49	238.67

细管管壁上。非常有趣的是不同分子量 PEO 的  $t_0'$  值基本是一致的。将方程 (2) 和 (5) 联立得到

$$\frac{t_0}{t_0'} = \left(1 - \frac{b}{R}\right)^4 \quad (7)$$

显然, 如果不同分子量 PEO 的  $t_0'$  值是一致的, 说明不同分子量 PEO 在毛细管管壁上吸附层厚度是一致的。根据 Flory 方程高分子在溶液中的尺寸与分子量是相关的, 分子量越大, 高分子在溶液中的线团尺寸越大<sup>[14]</sup>。既然吸附层厚度与分子量无关, 说明高分子吸附层厚度与溶液中高分子线团尺寸也是无关的。由此可见, PEO 分子链应该取平躺的方式吸附在毛细管管壁上。考虑到 PEO 分子是典型的具有表面活性的两亲性高分子。在水溶液中, PEO 分子链的亚甲基  $\text{CH}_2$  折叠起来, 醚键朝外, 与水分子形成氢键相互作用, 增加 PEO 分子的水溶性。而玻璃的表面是多羟基的, 因此, 当 PEO 分子吸附在毛细管管壁上时, 毛细管表面性质依旧没有多少变化, 这一点与聚乙烯吡咯烷酮 (PVP) 水溶液的粘度测定结果完全不相同。PVP 五员环上的羰基是亲水的, 可以和水中的氢形成氢键相互作用, 而 PVP 主链和五员环是憎水的, 因此对 PVP 分子来说, 其亲水基团将会优先吸附在毛细管管壁上, 导致毛细管表面性质发生显著改变, 具体表现为纯溶剂的流过时间  $t_0'$  要小于  $t_0$ <sup>[7]</sup>。对 PEO 分子来说, 当主链一侧的醚键与玻璃表面的羟基因氢键相互作用吸附在毛细管管壁上

时,主链另一侧的醚键依旧可以和水中的氢形成氢键相互作用,因此,PEO 分子吸附在毛细管管壁上并不会改变毛细管表面性质.由此可见,低浓度区 PEO 水溶液粘度行为和已知的实验事实并不相符,毛细管有效管径和表面性质都不能被用来解释 PEO 水溶液异常的粘度行为.

### 3.3 PEO 水溶液异常粘度行为的起源及校正方法

从式(3)和(6)可以看出,高分子溶液相对粘度的大小实际上是通过相同体积数高分子溶液和溶剂在粘度计中流过时间的比值来决定的,这就需要与高分子溶液和溶剂相对应的测量条件必须完全一致.检验这一点最好的方法是把高分子溶液流过时间对浓度作图外推到浓度等于零,其截距值  $t_0^*$  可以理解为理想条件下纯溶剂的流过时间.如果  $t_0^*$  等于  $t_0$ ,说明高分子并没有吸附在毛细管管壁上;如果  $t_0^*$  等于  $t_0'$ ,说明高分子虽然吸附在毛细管的管壁上,但是界面性质没有发生显著改变;如果  $t_0^*$  既不等于  $t_0'$  又不等于  $t_0$ ,情况将更加复杂.从图 2 可以看出,低浓度区不同分子量 PEO 水溶液流过时间与浓度之间满足线性关系,外推到浓度等于零可以得到理想条件下纯溶剂流过时间  $t_0^*$ ,结果见表 1.从中可以看出, $t_0^*$  比  $t_0'$  和  $t_0$  都要小,说明与纯溶剂相比较,PEO 水溶液流过时间系统地偏小.为了对此进行合理地解释,本工作系统测定了 PEO 水溶液和纯水的表面张力(表 2),测量误差为 0.1 mN/m.从中可以看出,PEO 水溶液的表面张力要显著低于纯溶剂的表面张力.如果 PEO 水溶液和纯溶剂的表面张力不相同,则在测量过程中溶液和纯溶剂因液面弯曲产生的附加压强  $\Delta p$  也是不相同的.附加压

强的计算式为<sup>[12]</sup>:

$$\Delta p = \frac{2\sigma\cos\theta}{r} \quad (8)$$

对 PEO 水溶液和纯溶剂水来说,在乌式粘度计的支管中因液面弯曲产生的附加压强与重力方向相反.

表 2 水和 PEO 水溶液以及苯和 PEO 苯溶液的表面张力

Table 2 The surface tension of the solvent and polymer solution of PEO with molecular weights of  $1.0 \times 10^5$  in the water and benzene at the room temperature

Water		Benzene	
$C_{\text{PEO}}(\text{g/dL})$	$\gamma(\text{N/m})$	$C_{\text{PEO}}(\text{g/dL})$	$\gamma(\text{N/m})$
0.000	0.0728	0.000	0.0297
0.025	0.0629	0.025	0.0295
0.050	0.0627	0.050	0.0296
0.100	0.0626	0.100	0.0294

PEO 水溶液的表面张力小,因液面弯曲产生的附加压强小,溶液流得快,导致 PEO 水溶液流过时间系统地偏小.如果 PEO 水溶液在低浓度区出现的负偏离是由于溶液和溶剂表面张力不同所导致,那么 PEO 分子在非极性溶剂中的粘度行为将明显有别于 PEO 在水中的粘度行为.从表 2 可以看出,PEO 苯溶液的表面张力和纯溶剂苯表面张力相同,因此,表面张力不会对 PEO 苯溶液的粘度测定产生影响.

图 3 给出了不同分子量 PEO 在苯和水中的粘度行为,从中可以看出,即便在低浓度区,PEO 苯溶

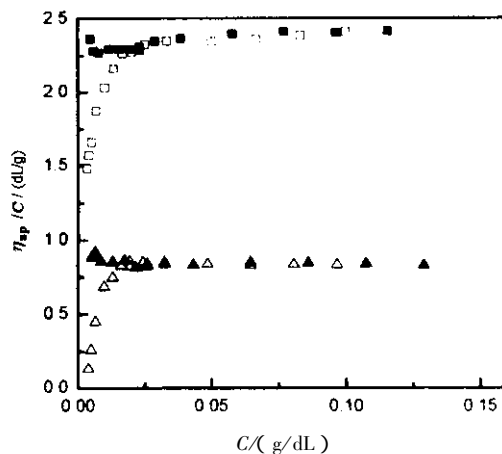


图 3 PEO 在苯和水中的粘度对浓度作图

Fig. 3 The reduced viscosity vs. concentration of PEO in both benzene and water

Benzene:  $\blacksquare$   $3.0 \times 10^5$ ,  $\blacktriangle$   $1.0 \times 10^5$ ;  
Water:  $\square$   $3.0 \times 10^5$ ,  $\triangle$   $1.0 \times 10^5$ .

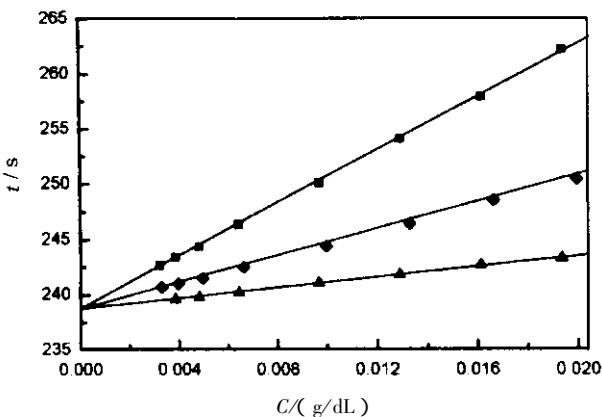


图 2 PEO 水溶液的流过时间对浓度作图

Fig. 2 The flowing time of the aqueous PEO solutions vs. concentration

$\blacksquare$   $9.0 \times 10^5$ ;  $\blacklozenge$   $3.0 \times 10^5$ ;  $\blacktriangle$   $1.0 \times 10^5$

液的比浓粘度与浓度之间依旧满足线性关系. 由此可见, PEO 水溶液异常的粘度行为完全是由于 PEO 水溶液和纯溶剂水表面张力的不同所导致. 显然, 如果将公式 (6) 中的  $t_0'$  换成  $t_0^*$ , 则表面张力对粘度测定结果的影响可以完全消除, 因为  $t_0^*$  是用高分子溶液流过时间对浓度作图线性外推得到的, 完全可以想象出与  $t_0^*$  相对应的纯溶剂的表面张力必然和高分子溶液的表面张力完全一致. 图 4 是将公式 (6) 中的  $t_0'$  换成  $t_0^*$  重新计算相对粘度得到的 PEO 水溶液比浓粘度对浓度作图, 从中可以看出, 两者之间满足线性关系, 说明用  $t_0^*$  重新计算相对粘度可以完全消除表面张力对粘度测定结果影响. 经过改进的粘度测定方法对乳液来说也是适用的<sup>[15,16]</sup>.

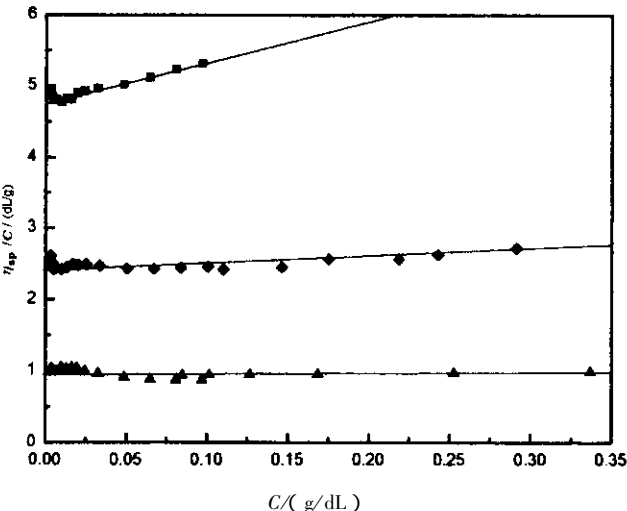


图 4 30°C 时不同分子量 PEO 水溶液的比浓粘度对浓度作图(相对粘度按  $t/t_0^*$  计算)

Fig. 4 The plot of the reduced viscosity vs. concentration for PEO in aqueous solutions at 30°C, the relative viscosity was calculated according to  $t/t_0^*$

■  $9.0 \times 10^{-5}$ ; ◆  $3.0 \times 10^{-5}$ ; ▲  $1.0 \times 10^{-5}$

### 3.4 PEO 水溶液和纯水表面张力差异对粘度测量结果影响的定量计算

利用 PEO 水溶液和纯溶剂水表面张力以及在玻璃表面接触角的测定结果(水和 PEO 稀溶液在玻璃表面的接触角为  $22^\circ$ ) 结合乌式粘度计的几何尺寸, 可以定量分析 PEO 水溶液和纯溶剂水表面张力的差异对粘度测定结果的影响. 对乌式粘度计来说, 待测液体被抽提到粘度计支管的 G 球中, G 球的下部连着毛细管, G 球的上下两端各有一刻度线 E 和 F, 如图 5 所示. 实际测量过程中弯曲液面经过 E 刻

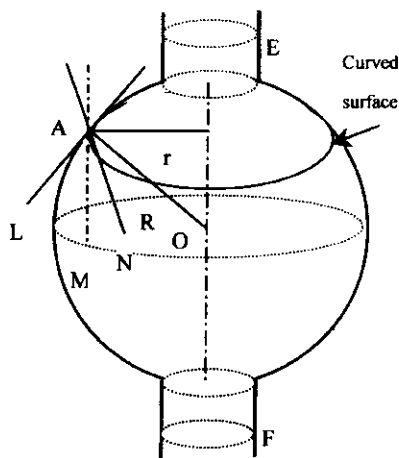


图 5 G 球中因液面弯曲产生的附加压强

Fig. 5 The additional pressure originated from the curved surface of the liquid in G ball

度线时开始记时, 经过 F 刻度线时停止记时. 显然, 从 E 到 F 之间管壁的直径以及管壁与垂直线所成的角度在流动过程中时时在改变<sup>[11]</sup>, 因此, 式 (8) 不能直接被用来计算因液面弯曲产生的附加压强, 因为推导该公式时假定管壁是直的<sup>[12]</sup>. 假设把 G 球理想化地看成是球体, L 和 M 分别为 G 球上任一点 A 所对应的切线和铅垂线, N 为弯曲液面在 A 点处的切线, R 为 G 球的半径, r 为圆柱的半径. 从图 5 可以看出, L 和 N 的夹角(锐角)即为接触角, 但是该接触角不能直接代入式 (8) 进行计算, 因为推导式 (8) 时假定管壁是竖直的. 如果把 M 等效地看成是虚拟的管壁, 则式 (8) 中的  $\theta$  角应该是 M 和 N 之间的夹角. 假定流速基本保持恒定, 则 G 球中的流体因液面弯曲产生的附加压强的平均值为:

$$\bar{\Delta p} = \frac{2\sigma \sum_i [\cos(\theta - \arccos \frac{r_i}{R}) / r_i \int \pi r_i^2 \Delta h_i]}{\sum_i \pi r_i^2 \Delta h_i} \quad (9)$$

式 (9) 中  $\Delta h_i$  为将 G 球等厚度分成很多层时每一层的厚度;  $[\cos(\theta - \arccos \frac{r_i}{R}) / r_i \int \pi r_i^2 \Delta h_i]$  为权系数, 反映该层对平均压强的贡献;  $\sum_i \pi r_i^2 \Delta h_i$  为归一化因子. 本工作将 G 球等厚度地分成 10 层, 实际所用的粘度计 G 球的半径 R 为 10 mm. 如果式 (9) 中的  $\sigma$  换成是纯水和 PEO 水溶液表面张力的差, 则计算结果  $\bar{\Delta p}$  应该是水和 PEO 水溶液附加压强平均值的差, 为 3.25 Pa. 根据粘度计的几何尺寸, 促使液体流动的液面高度 (G 球中心到毛细管出口的距离) 为 120 mm, 因此,

总压强为 1176 Pa. 附加压强平均值的差与总压强的比值为 2.8%. 根据测量结果  $t_0^*$  和  $t_0'$  的差  $\Delta t$  与  $t_0'$  的比值为 3.5%, 考虑到在计算过程中引入的近似条件, 可以认为两者是比较接近的, 说明水和 PEO 水溶液表面张力的差异对流过时间影响的计算结果与测量结果基本是一致的.

#### 4 结 论

利用高分子溶液流过时间  $t$  测定之前和之后纯溶剂在乌式粘度计中的流过时间  $t_0$  和  $t_0'$  之间的差异, 证实了在高分子溶液粘度测量过程中, PEO 分子会吸附在毛细管管壁上, 吸附层厚度与 PEO 分子量无关, 由此推断出 PEO 分子是以平躺的方式吸附在毛细管管壁上, 但是毛细管表面性质不会因此而产生显著改变. 导致低浓度区 PEO 水溶液比浓粘度出现负偏离是由于 PEO 水溶液和纯溶剂水表面张力差异显著. 用理想条件下纯溶剂流过时间  $t_0^*$  计算相对粘度, 可以完全消除 PEO 水溶液和纯溶剂水表面张力差异对粘度测定结果的影响. PEO 水溶液和纯溶剂水表面张力差异对粘度测量影响的计算结果与实验结果基本是吻合的. 如果将 PEO 分子溶解在非极性溶剂中( PEO 溶液和纯溶剂表面张力相同) 则即便是在低浓度区, PEO 溶液的比浓粘度与浓度之间依旧满足线性关系, 进一步证实低浓度区 PEO 水溶液异常的粘度行为是由于 PEO 水溶液和纯溶剂水表面张力差异所致.

#### 参 考 文 献

[ 1 ] Pan Y , Cheng R. *Chin. J. Polym. Sci.* , 2000 , **18** : 57  
 [ 2 ] Cheng R , Yang Y , Yan X. *Polymer* , 1999 , **40** : 3773  
 [ 3 ] Yang Y , Yan X , Cheng R. *J. Macromol. Sci. Phys.* , 1999 , **B38** : 237

[ 4 ] Cheng R , Shao Y , Liu M , *et al.* *Eur. Polym. J.* , 1998 , **34** : 1613  
 [ 5 ] Liu M , Cheng R , Qian R. *J. Polym. Sci. Part B : Polym. Phys.* , 1997 , **35** : 2421  
 [ 6 ] Yang HY , Zhu PP , Peng C L , *et al.* *Eur. Polym. J.* , 2001 , **37** : 1939  
 [ 7 ] Yang Haiyang ( 杨海洋 ) , Li Hao ( 李浩 ) , Zhu Pingping ( 朱平平 ) , *et al.* *Bull. Chem.* ( 化学通报 ) , 2002 , **65** : 631  
 [ 8 ] Yang Haiyang ( 杨海洋 ) , Zhu Pingping ( 朱平平 ) , Ren Feng ( 任峰 ) , *et al.* *Bulletin Chem.* ( 化学通报 ) , 1999 , **62** : 47  
 [ 9 ] Li Hao ( 李浩 ) , Yang Haiyang ( 杨海洋 ) , Zhu Pingping ( 朱平平 ) , *et al.* *J. Functional Polymers* ( 功能高分子学报 ) , 2002 , **15** : 319  
 [ 10 ] Li Hao ( 李浩 ) , Yang Haiyang ( 杨海洋 ) , Zhu Pingping ( 朱平平 ) , *et al.* *J. Functional Polymers* ( 功能高分子学报 ) , 2002 , **15** : 334  
 [ 11 ] Qian Renyuan ( 钱人元 ). *The Molecular Weight Measurement of Polymer* ( 高聚物的分子量测定 ) , Beijing ( 北京 ) : Science Press ( 科学出版社 ) , 1958.  
 [ 12 ] Paul C Hiemenz. *Principles of Colloid and Surface Chemistry* , Marcel Dekker Inc. , 1977  
 [ 13 ] Öhrn OE. *J. Polym. Sci.* , 1955 , **17** : 137 ; 1956 , **19** : 199  
 [ 14 ] Flory PJ. *Principle of Polymer Chemistry*. Ithaca , NY : Cornell University Press , 1953.  
 [ 15 ] Duan Yufeng ( 段玉丰 ) , Zhang Qiang ( 张强 ) , Yang Jun ( 杨俊 ). *Chin. J. Chem. Phys.* ( 化学物理学报 ) , 2001 , **14** : 507  
 [ 16 ] You Lisha ( 尤丽莎 ) , Fu Zhong ( 傅中 ) , Wu Huaqiang ( 吴华强 ) , *et al.* *Chin. J. Chem. Phys.* ( 化学物理学报 ) , 2001 , **14** : 474