

# 胀流型流体狭缝流流动增强现象研究<sup>1)</sup>

路展民 范椿 刘战存

(中国科学院力学研究所,北京,100080)

**提要** 用激光多普勒测速法(LDV)测量了一种胀流型流体——107 胶溶液的狭缝流的速度剖面和近壁速度。在对 Poiseuille's 流的公式作有关侧壁影响的修正后,将 LDV 的测量结果和总体参量测量结果结合,分析了该流动的增强的迹象和数量。表明用 LDV 详细研究流动增强现象是可行的。

**关键词** 壁面滑移,流动增强,激光多普勒测速法

## 一、引言

对高聚物溶液的层流,已观察到流动增强或所说的表观滑移现象<sup>[1-6]</sup>。例如对毛细管流动,测得的流量大于按无滑移边界条件和由均匀应力场中获得的具体本构关系所计算出的流量。对于这种现象,已提出了一些理论,其中包括近期的由 Y. Cohen 和 A. B. Metzner 发展的大分子漂移理论<sup>[6]</sup>。在现阶段,这些理论分析还缺少足够的实验检验。因为迄今对这种现象的实验研究以毛细管中的流动居多,使用的是压降、流量这样的总体量,缺少理论分析所最需要的速度剖面和浓度剖面。这对深入探讨流动增强现象的机理,是很大的限制。相同的流量增量,可以来自不同的速度剖面的变化。流量测量必须和速度剖面测量联系起来,才能揭示流动增强现象的更多的内容。因此,与流量测量一起,用激光多普勒法(LDV)测量分析高聚物流动的结构,应是一合理的研究途径。圆管中的流动虽然简单,但是不适于使用 LDV 作测量特别是作近壁测量。狭缝中的流动兼有流动的简单性和 LDV 测量的可行性,但是却存在侧壁影响,须设法加以修正。本文一方面用 LDV 测量了狭缝中 107 胶稀释液流的速度剖面,特别是近壁速度分布,显示出与无滑移模型的明显的区别,另一方面,在考虑了狭缝流的侧壁影响的条件下,通过中心速度与流量的测量,以及无滑移流量的理论计算,显示出实际流动对无滑移流量的流量增加。由前者近壁速度测量所估算出的流量增量,与后者所估算出的基本一致。这一事实说明,虽然近壁速度测量会包含不确定度,本文测量的近壁速度的基本数量仍然是可信的。本文的实验结果也说明,用 LDV 研究高聚物溶液流动的增强现象是可取的。

## 二、实验设备和液流性质

实验设备示于图 1。水箱中的 107 胶液在重力驱动下流经水平放置的长 0.8m 的有机

1) 本文的研究受国家自然科学基金资助。  
本文于 1990 年 4 月 11 日收到第一稿,1991 年 4 月 10 日收到修改稿。

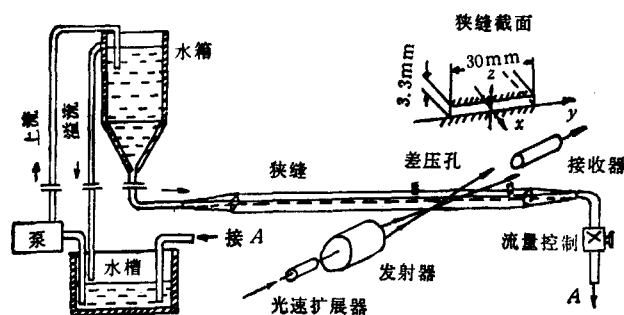


图 1 实验装置

玻璃狭缝。狭缝间隙 0.334cm, 宽 3.0cm。液面靠溢流管保持一定。使用工作于正前向接收方式的条纹型激光多普勒测速计, 在离出口约 25cm 处截面上(坐标设置见图 1), 沿垂直中心线( $z$  轴)移动测点, 测量轴向速度分布。光电原始信号用截频很低(约 100Hz)的高通滤波器除去基座, 然后用有模-数变换的相关仪测量多普勒频率  $F_d$ 。使用约 4 倍的光束扩展器改进测量时的空间分辨。经检验, 对分辨起作用的探测体短轴尺寸约为 0.16mm。107 胶液是聚乙烯醇缩甲醛的水溶物, 属于胀流型流体。使用商品原液加水稀释, 配比是 107 胶 24:水 76。用 NXS-11 型转筒粘度计测量该液的流变性质, 得幂律指数  $n=1.05$ , 稠度系数  $K=0.0132\text{Pa}\cdot\text{s}^n$  (剪切速率  $\dot{\gamma}$  300-1000 1/s)。在管道流动中, 使滑移完全表现所需的充分发展长度比一般意义上的充分发展长度要大得多。但对排除入口对速度近壁分布的影响来说, 只需用一般意义上的充分发展概念。用 107 胶液的流变性质, 计算最高剖面平均速度  $\bar{V}=17\text{cm/s}$  时的广义雷诺数<sup>[7]</sup>

$$Re_{PL1} = \frac{D^n \bar{V}^{2-n} \rho}{K}, \quad Re_{PL2} = Re_{PL1} \times 8 \left( \frac{n}{2+6n} \right)^n \quad (1)$$

两者是  $n$  的降函数, 可取  $n=1$  并取  $D=0.6\text{cm}$  (狭缝的等效直径)、 $\rho \approx 1\text{g/cm}^3$ , 可得  $Re_{PL1}=78$ ,  $Re_{PL2}=36$ 。按文献[7]式:

$$\frac{2X_D}{D Re_{PL1}} = 0.05 \quad (2)$$

估算入口长度  $X_D \approx 1.2\text{cm}$ 。仅为入口至测量剖面处的距离  $L=55\text{cm}$  的 2% 左右。因此入口影响一般而言可予忽略。

### 三、速度的剖面和近壁分布

较低流速的一组剖面数据示于图 2 中。图上的曲线是按照无滑移幂律表达式, 除去近壁数据和中心数据后拟合而得, 幂律指数  $n=1.10$ 。另三种中心流速  $V_0$  时的近壁速度分布示于图 3。按这些分布的趋势将曲线外推到壁面, 可得暂称为壁面流速的有限值  $V_w$ 。由四组测量所得的  $V_w$  与  $V_0$  之比很接近:  $V_w/V_0 \approx 0.077$ 。综合图 2 和图 3 可见, 在近壁处速度趋向抬高, 明显地不同于无滑移模型的分布。当探测体十分接近壁面甚至有部分进入壁内时, 与其它部分流速测量比较, 所测数据会包含有较大的误差。人们可以要求确定近壁数据中所包含的误差的分量, 但是要明确无误地确定目前仍存在困难。因

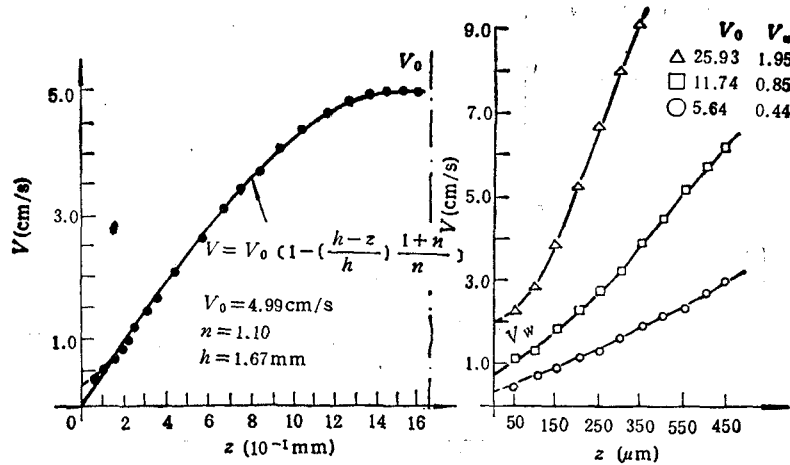


图 2 107 胶液流速半剖面

图 3 107 胶液流近壁速度

为 LDV 近壁测量的误差分析即使对牛顿流体也十分复杂,且缺乏实验的检验。在层流时,LDV 近壁测量的误差来源主要由三部分组成,一是光电噪声的影响,二是探测体接近壁面甚至部分进入壁内时所产生的偏差,三是测点定位不准所引起的偏差。由于本文的测量使用自相关法处理信号,能适应信噪比很低的情况,因此主要考虑后两者。D. K. Kreid (1974) 分析了探测体很逼近壁面甚至部分进入壁内时牛顿流体的管道层流和湍流的 LDV 测量的误差<sup>[8]</sup>,给出了表达于探测体参数及其中心与壁面距离的误差估计式。对于非牛顿流的近壁速度分布,理论上可以有如图 4 所示的几种模式。I 是真实壁面滑移型;II 是存在很薄层的高剪切率层的表观滑移型;III 是与无滑移较接近的比较均匀的表观滑移型。对于  $n$  值接近牛顿流体的 107 胶液流,若按[8]中给出的层流近壁速度测量误差表达式,以及本实验中的具体探测体参数估算,当探测体中心距壁面约  $50\mu\text{m}$  时,测得值约比探测体中心处应有速度大十分之一。当滑移是由图 4 中模式 II 所示的,厚度比探测体尺寸小很多的高剪切率薄层流体所产生时,这一层流体中散射的光功率仅占探测体散射总功率的很小一部分,光电信号功率的大部分反映的是已上升了的、邻近薄层的流体的速度。就所测的这一速度而言,因分布已较平坦,误差会小于上述估计值。在本文实验中,最接近壁面测点的定位,是由水层流测量的近壁分布外推到零,以及估计针孔光阑处探测体成像的中心与壁面边缘成像的距离的方法确定的。由目镜的放大率及人眼的分辨率估计,这可能会产生  $20\mu\text{m}$  的不确定度,会引入约十分之三的误差。但是从同一工况下不同次测量所得的壁面速度的分散范围来看,定位不准的偏差不会到达这一数量。因此最接近壁面的测点的速度测量的相对误差仍在十分之三内。

#### 四、由壁面速度及由计算所得流量增量的对比

在等截面管道的流动中,管剖面中心速度  $V_0$  和剖面平均速度  $\bar{V}$  的比值  $P = V_0/\bar{V}$  可衡量速度剖面分布的尖锐程度,因此可称为速度剖面的峰化度,用于检查速度剖面形状的变化。在忽略侧壁影响时,狭缝中的充分发展了的层流可认为是平行平面中的一维流

动。对于幂律型流体的 Poiseuille's 型无滑移狭缝流有<sup>[9]</sup>

$$\frac{V(z)}{\bar{V}} = \left(\frac{1+2n}{1+n}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{h-z}{h}\right)^{\frac{1+n}{n}}\right] \quad (3)$$

其中坐标系的取法见图 1 所示, 原点取在狭缝的底面上。由该式可得作为  $n$  的增函数的峰化度

$$P = \left(\frac{1+2n}{1+n}\right) \quad 1 < P < 2$$

对于牛顿流体( $n=1$ ),  $P=1.5$ , 对于胀流型流体( $n>1$ ),  $P$  值应大于 1.5。但是由于狭缝侧壁的影响, 实际的流动是两维状态,  $P$  值也会与一维状态时的值不同。为了加以修正, 实测了该狭缝中水流的  $P$  值。用 LDV 测量, 流量  $Q$  用经校准至准确度为 1% 的量杯测量。多次测量获得的峰化度值是  $P_{H_2O} = 1.645 \pm 0.020$ , 是无侧壁影响时的 1.097 倍。当狭缝的宽度  $W$  和间隙  $2h$  之比很大时, 中心速度几乎不受侧壁的影响。因此峰化度所受侧壁影响主要来自流量的减小。实际上, 从有侧壁和无侧壁时, 狭缝单位长度上摩擦力的差别, 也可估算出侧壁对狭缝流流量的影响: 在压降相同时有侧壁时的壁面剪切力  $\tau_w$  应比无侧壁时的壁面剪切力  $\tau'_w$  小

$$\frac{\tau_w}{\tau'_w} \approx \frac{1}{1+2h/W} = 0.900$$

将壁面剪切力代入无滑移幂律型 Poiseuille's 狭缝流的流量计算式子, 可以估算出有侧壁影响的无滑移流量  $Q_s$  与无侧壁影响的无滑移流量  $Q'_s$  之比,

$$\frac{Q_s}{Q'_s} = \left(\frac{\tau_w}{\tau'_w}\right)^{\frac{1}{n}} = \frac{1}{\beta} \quad (4)$$

$\beta$  即为侧壁影响修正系数。显然, 当  $|n-1| \ll 1$  时, 非牛顿流的修正值与水的修正值很接近, 因此按

$$P_{\text{Non-Newton}} = 1.097 \left(\frac{1+2n}{1+n}\right) \quad (5)$$

估算 107 胶液无滑移流动的  $P$  值, 当  $n=1.05$  时,  $P_{107}$  (估算)=1.66。但是, 由 4 次实测所得  $P$  值是  $P_{107}$  (实测)= $1.56 \pm 0.02$ 。该值小于上述的无滑移假定下的估算值, 甚至小于水流的实测  $P$  值。这一事实说明, 在 107 胶液的实际流动中, 一定存在相对于无滑移流动的流量的增加。进一步检查流动增强的存在, 可按无滑移 Poiseuille's 型狭缝流的流量计算式子<sup>[9]</sup>, 再经侧壁影响修正后计算无滑移流量

$$Q_s = \left(\frac{h}{K} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta L}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{nAh}{\beta(1+2n)} \quad (6)$$

其中  $K$ 、 $n$  分别为用 NXS-11 转筒粘度计测得的稠度系数及幂律指数,  $\Delta L=25\text{cm}$  是测压孔的距离,  $\Delta p$  是由压差计在实验测量时测出的压降,  $\beta$  是侧壁影响的修正系数, 取  $\beta=1.097$ 。不同压降下的实测流量  $Q$  和由式(6)计算出的无滑移流量  $Q_s$  的对比示于图 5。由此可求出相对流量增量

$$\frac{Q_s}{Q} = \frac{Q - Q_s}{Q} \approx 0.108 \pm 0.015 \quad (7)$$

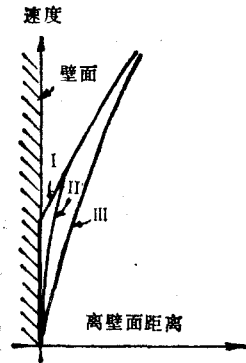


图 4 近壁速度模式

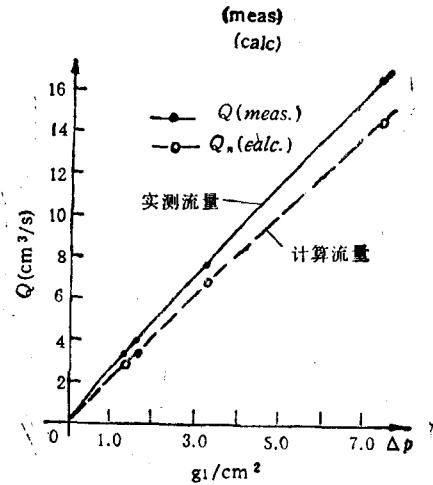


图 5 实测流量(—●—)和计算流量(—○—)

另一方面,由壁面速度  $V_w$  及狭缝的截面积  $A$  所计算出的流量增量  $Q_s = V_w \cdot A$  亦可计算出相对滑移增量

$$\frac{Q_s}{Q} = \frac{V_w \cdot A}{Q} = \frac{0.077V_w A}{Q} \approx 0.120 \quad (8)$$

这与式 (7) 所得的结果相当一致。这说明,壁面速度的测量值基本上是正确的。在一些文献中习惯使用的滑移速度  $V_s$  是一个等效量  $V_s = \frac{Q_s \cdot \bar{v}}{Q}$ , 由本文的结果来看  $V_w = \frac{Q_s \cdot \bar{v}}{Q} = V_s$ , 但是  $V_w$  不只是等效量,而且是由实际测量所得的速度。因此当滑移层很薄时,  $V_w$  接近于真实的壁面滑移速度。

本文测量出的近壁速度存在转折点。这是由测量误差引起,还是近壁流动所固有的现象,尚需进一步的研究。

## 五、结 论

1. 用 LDV 法测量了狭缝中的 107 胶液流的速度剖面和近壁速度。近壁速度分布与无滑移模型流动应有的分布比较有明显的区别。

2. 实测的该液流的峰化度与无滑移流峰化度估算值的区别显示流动有增强迹象。不同压降下的实测流量与按无滑移模型计算并经侧壁影响修正后的流量的明显差别定量地表示了该狭缝流的流动增强。

3. 由壁面速度估算的滑移流量增量,与由理论计算和实测的流量的差别所估算的流量增量基本一致,说明所测得的壁面速度基本上就是等效滑移速度。同时也说明,虽然因空间分辨的限制,本文所测的壁面速度是一个外推值,壁面速度的测量基本上仍是正确的。

通过本文的研究,提出了一种把流量测量和 LDV 测量相结合的研究流动增强现象

的方法。进一步,可以在提高 LDV 测量精度的条件下,通过对速度剖面的详尽分析,分析流动增强和速度剖面变化之间的关系。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Astarita, G. et al. *Ind. Eng. Chem. Fund.*, 1964: 3: 333.
- [ 2 ] Vinogradiv, G. V. and Ivanova, L. I. *Rheol. Acta*, 1968, 7: 243.
- [ 3 ] Bartos, O. and Holomek, J. *Polym. Eng. Sci.*, 1971, 11: 324.
- [ 4 ] Kraynik, A. M. and Schowalter, W. R. *J. Rheol.* 1981, 25: 95.
- [ 5 ] Cohen, Y. and Metzner, A. B. *J. Rheol.* 1985, 29: 67.
- [ 6 ] Cohen, Y. and Metzner, A. B., *Rheol. Acta*, 1986, 25: 28.
- [ 7 ] Govier, G. W. and Aziz, K. *The Flow of Complex Mixtures in Pipes*, Van Nostrand Reinhold Co. New York, 1972.
- [ 8 ] Kreid, D. K. *Applied Optics*, 1974, 13: 1872.
- [ 9 ] Coleman, B. D. et al., *Viscometric Flows of Non-Newtonian Fluids*. Springer, Berlin, 1966.

## INVESTIGATION FOR FLOW ENHANCEMENT PHENOMENON OF DILATANT FLOW IN A NARROW SLIT

Lu Zhanmin Fan Chun Liu Zhancun

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing, 100080, China*)

**Abstract** LDV is used to measure the velocity profiles and near wall velocities for a dilatant flow—gel 107 solution flow in a slit. After some modification in the Poiseuille flow formulas has been made for side-wall effect correction, the results of LDV measurements combined with bulk parameters are utilized to analyse the enhancement evidence and quantities of the flow. The feasibility of using LDV to investigate flow enhancement phenomenon in detail is demonstrated.

**Key words** wall slip, flow enhancement, laser doppler velocimetry