

用旋转粘度计作在线连续测量的动态问题

孔德湧 高东杰
(中国科学院自动化研究所)

摘 要

非牛顿流体的粘度不定性及轴向流体运动都会对粘度测量值产生重要影响。本文对这些问题进行了讨论并在实践中取得了一些结果。

一、粘度测量的复杂性

粘度是液体对抗相对运动或变形的一种物理性质。粘度包括剪切粘度和拉伸粘度。本文主要讨论在工业生产过程中广泛采用的旋转粘度计测量剪切粘度时的动态问题。剪切粘度,可定义为

$$\eta = \tau/q. \quad (1)$$

其中 τ 为剪切应力; q 为垂直于应力方向的流体速度梯度,称剪切率; η 为剪切粘度(以下简称粘度)。粘度测量的复杂性主要是由下列因素产生的:

1) 不同的被测物料具有不同的物理特性,其中最主要的是流体的非牛顿性。按公式(1),如果改变剪切率 q , τ 随之按比例地变化。粘度 η 为一常数的流体称为牛顿流体,否则称为非牛顿流体。对于后者来说, q 不同测得的粘度是不同的,称这种粘度为表观粘度,用 η_a 表示。所以对非牛顿流体来说,在给出 η_a 的同时应注明剪切率 q 值。

如何计算各种粘度计在不同的工作状态下的剪切率和剪切应力,从而确定表观粘度,是流变学的主要研究课题之一。流体的粘弹性以及粘度的时变性等,在某些情况下也会对粘度测量值产生较大的影响。

2) 不同类型的粘度计适用于不同的流体几何特性,同一种液体用不同的粘度计测量,所测得的粘度在正确的校正和补偿后,误差可缩小到3—5%,否则,误差可达十倍之多^[1]。

3) 测试环境的影响。温度对测量值的影响最大,约1—10%/°C,而且是非线性关系。压力的影响比较小。流量的影响将在下面进行详细讨论。

二、动态问题

工业用旋转粘度计的种类繁多,其中最主要的一种是同心双圆柱体式结构.被测物料处于两个圆柱体之间的间隙中.圆柱体之一由电动机带动旋转.旋转力矩与物料的粘度之间存在一定关系,用电或机械方法来测量力矩就可得到相应的物料粘度,这就是旋转粘度计的基本原理.

假定内外圆柱体之间的间隙环中存在简单的剪切流,即速度向量 $v = (v, 0, 0)$. 其中 $v = rw(r)$. $w(r)$ 为半径 r 处的角速度. $R_1 < r < R_2$, R_1 为内圆柱半径, R_2 为外圆柱内径. 设内圆柱转速为 Ω , 作用在内圆柱上的力矩为 T , 在稳态情况下, T 与流体粘性力作用在内圆柱表面的力矩相平衡,得

$$T = 2\pi L R_1^2 \tau_{R_1}. \quad (2)$$

其中 L 为内圆柱工作面高度; τ_{R_1} 为作用在内圆柱表面的剪切应力. 对于间隙环中半径为 r 的圆柱面来说,在稳态情况下根据(2)式可得

$$r^2 \tau = \text{const.} \quad (3)$$

对(3)式微分得

$$2dr/r = -d\tau/\tau. \quad (4)$$

根据剪切率 q 的定义,有

$$q = -\frac{dv}{dr} = -r \frac{dw}{dr} = f(\tau). \quad (5)$$

将(4)式代入(5)式并积分得

$$w = \frac{1}{2} \int_{\tau_2}^{\tau_1} \frac{f(\tau)}{\tau} d\tau. \quad (6)$$

将边界条件 $r = R_2$ 时, $w = 0$; $r = R_1$ 时, $w = \Omega$, 代入(6)式得

$$\Omega = \frac{1}{2} \int_{\tau_2}^{\tau_1} \frac{f(\tau)}{\tau} d\tau. \quad (7)$$

对(7)式微分得

$$d\Omega/d\tau = \frac{1}{2} \left[\frac{f(\tau_1)}{\tau_1} - \frac{f(\tau_2)}{\tau_2} \frac{d\tau_2}{d\tau_1} \right]. \quad (8)$$

从(3)式得

$$R_1^2 \tau_1 = R_2^2 \tau_2, \text{ 即 } d\tau_2/d\tau_1 = (R_1/R_2)^2 = s^2. \quad (9)$$

代入(9)得运动方程

$$2\tau_1(d\Omega/d\tau_1) = f(\tau_1) - f(s^2\tau_1). \quad (10)$$

用迭代法可得到一个用无穷级数表示的解

$$q = f(\tau) = 2\Omega \sum_{p=0}^{\infty} s^{2pm} m(s^{2p}\tau). \quad (11)$$

其中

$$m = d \ln \Omega / d \ln \tau. \quad (12)$$

这个无穷级数收敛很慢。Krieger, I. 用一近似式来代替该级数。Aperblet, A 等人将(10)式中的 $f(s^2\tau_1)$ 项用台劳级数展开后得到的级数比(11)式收敛得快。

假设被测物料是指数律的非牛顿流体，

$$\tau = Kq^n, \quad n < 1. \quad (13)$$

从(13),(3)和(5)式得

$$C/r^2 = K(-rdw/dr)^n,$$

即

$$dw/dr = C_1 r^{-\left(\frac{2+n}{n}\right)}. \quad (14)$$

其中 C_1 是待定常数。按 q 的定义得

$$q = -r(dw/dr) = -C_1 r^{-2/n}. \quad (15)$$

利用前面提到的边界条件得

$$C_1 = 2Q/n[R_2^{-2/n} - R_1^{-2/n}]. \quad (16)$$

从上二式可得 $q \propto C_1 \propto Q$ ，从(2)式可得 $T = k\tau = kq^n$ 。由此得

$$T_1/T_2 = Q_1^n/Q_2^n,$$

即

$$\log T_1 - \log T_2 = n(\log Q_1 - \log Q_2). \quad (17)$$

这就是用来确定指数律流体 n 实验方法的基础。改变内圆柱转速，从 Q_1 变到 Q_2 ，测得 T_1 和 T_2 ，就可求得 n 。

笔者用实验方法测得长征化工厂 PET 聚酯在 282°C 时的流体特性为

$$\tau = 4675.8q^{0.832}.$$

当 $q = 0.594 \text{ 秒}^{-1}$ 时的表观粘度 $\eta_a = 5103.4$ 泊，与用外国公司所给公式计算的结果接近。

现在考虑流体加上轴向流动的情况。两个方向的速度合成，使物料粒子作螺旋线运动(见图 1)。文献[2]对此作了一个很好的综述，但两个方向的速度之比小于二。而笔者遇到的实际问题是两个方向的速度比约为三十五。对于这么悬殊的速度比带来的流变学问题还没看到有文章讨论过。有的文章提到这种粘度计工作时不应有轴向流速^[3]。由于这种情况下流体几何的复杂性，目前只能作一些定性的讨论。

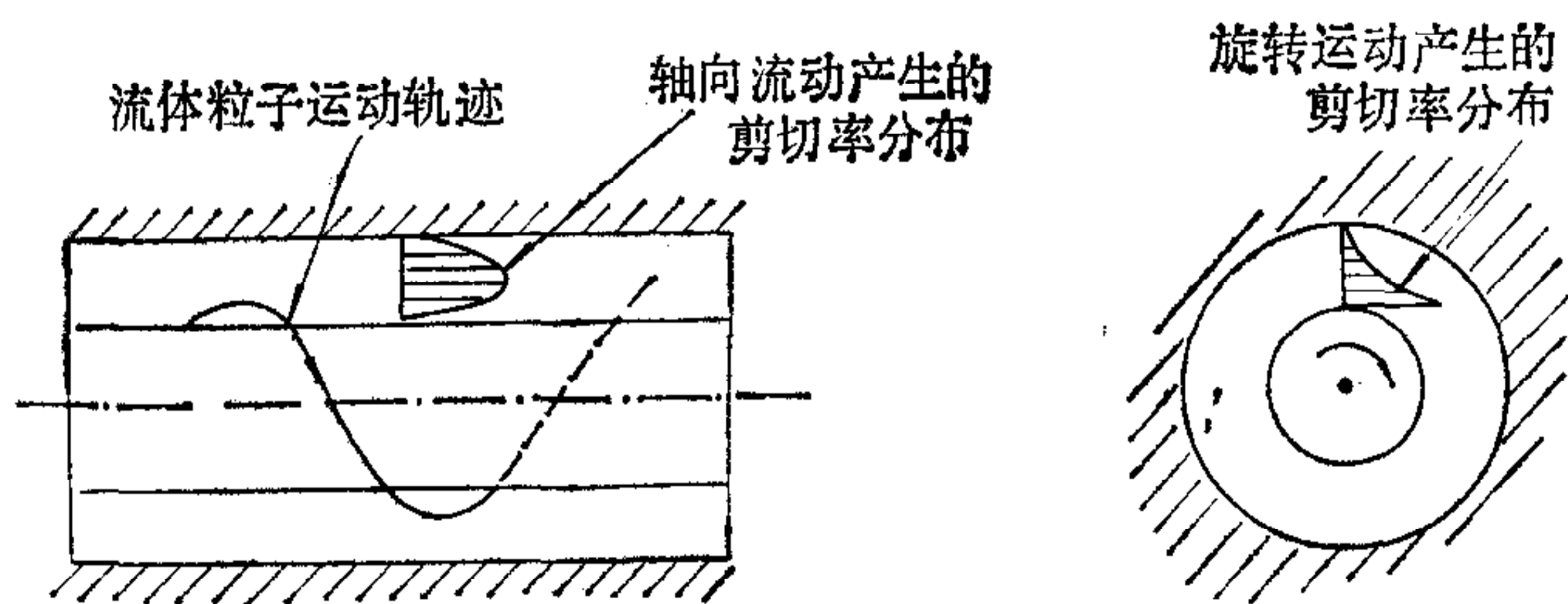


图 1 螺旋流

从图 1 可看到，经过一定径向距离 Δr 后，由于轴向流速远远大于旋转速度，螺旋角等于 90° 。这意味着工作间隙由原来的 $R_2 - R_1$ 变成了 Δr ，它随轴向流速的加大而变小。从粘度计算公式来看^[3]，

$$T = CQ\eta, \quad (18)$$

$$C = 4\pi R_1^2 R_2^2 L / (R_2^2 - R_1^2) = 4\pi R_1^2 R_2^2 L / (R_2 + R_1)(R_2 - R_1) \\ \doteq 2\pi R_1 R_2^2 L / (R_2 - R_1) < \pi R_1 R_2^2 L / \Delta r. \quad (19)$$

从(15)和(16)式也可看到,随着 R_2 的减小, q 将减小,所以 η 将增加. 从上式可看到,随着 Δr 的减小, C 将增大. 所以,粘度计测得的力矩 T 将随着轴向流速的加大而增大,但很快就饱和了. 这是由于一旦螺旋角达到 90° 以后,轴向流速对 Δr 的影响迅速减小. 现场实验结果也证实了在轴向全速附近改变轴向流速对测量值的影响很小,一旦从全速降到零,粘度计指示值下降 10%. 附带要说明的是,根据这时的雷诺数,流体还是层流,不是紊流,所以对流量的影响不是由于紊流引起的.

本文承蒙中国科学院自动化所胡启恒所长和北京大学力学系英籍客座教授陈文芳先生在百忙中详细审阅了全文,并提出了极其宝贵的意见. 在此谨致以深切的谢意.

参 考 文 献

- [1] Cheng, D. C. -H., A Comparison of 14 Commercial Viscometers and a Home-made Instrument, Warren Spring Lab. 1978.
- [2] Winter, H.H., Helical Flow of Molton Polymers in a Cylindrical Annulus, *Rheol. Acta*, **12** (1973), p. 1.
- [3] Walters, K., Rheometry: Industrial Applications, S and T Press, 1980.

DYNAMIC PROBLEMS OF ON-LINE CONTINUOUS MEASUREMENT WITH ROTATIONAL VISCOMETER

KONG DEYONG GAO DONGJIE

(Institute of Automation, Academia Sinica)

ABSTRACT

The non-constant viscosity of non-Newtonian fluids and the fluid motion along the axial direction influence the measurement of viscosity considerably. These problems are discussed in this paper and some results are gained from the practice.