

一种新型 Couette 流变仪的力矩修正和 粘度测量误差分析*

李良才, 郭关柱, 范毓润*

(浙江大学 流体传动与控制国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为准确计算出新型 Couette 流变仪工作段剪切力矩, 通过对计算机采集的电机输出转矩进行校核, 得出了电机输出转矩真实值; 利用商业旋转流变仪测量, 得出了实验流体标准大气压下的粘温关系, 最后得出了修正力矩与雷诺数的关系。考虑到该流变仪在制造和数据采集中存在误差, 利用误差传递计算方法得出了新型 Couette 流变仪在测量流体粘度时的误差范围。分析结果为进一步测量不同状态下流体的粘度和研究空化奠定了基础。

关键词: Couette 流变仪; 力矩修正; 粘度测量; 误差分析

中图分类号: TP202+.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)04-0008-04

Torque modification of a new Couette rheometer and error analysis of the viscosity measurement

LI Liang-cai, GUO Guan-zhu, FAN Yu-run

(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to accurately calculate the shear torque in the working section of the new Couette rheometer electrical motor output torque data collected by the computer were rectified and the real data was gotten. A commercial cone-plate rheometer was utilized to obtain the viscosity and temperature relationship of experimental liquid. And a relationship between modified torque and Reynolds number was finally given. Considering the errors of the new Couette rheometer both in manufacturing process and data collecting process, the error band liquid viscosity was accounted by error transfer calculation method. The result shows that it builds a solid foundation for liquid viscosity measurement under various conditions and cavitations researches in future.

Key words: couette rheometer; torque modification; viscosity measurement; error analysis

0 引 言

流变仪是用来测量液体和聚合物熔体粘度、弹性、法向应力、拉伸粘度等流变性质的仪器。现有流变仪种类及其优缺点如下: ①毛细管流变仪, 具有装料容易, 测试温度和剪切速率容易调节等优点^[1], 但剪切速率不均匀、沿毛细管径向发生变化, 进出口压力需要校正等; ②旋转平板流变仪, 采用小间距能抑制二次流动^[2], 有利于安装光学设备和施加电磁场, 适合于测定大粘度流体在低剪切速率下的变形, 但是剪切速率

不均匀(延平板径向方向变化), 高剪切速率下, 被测流体会被抛出; ③旋转锥板流变仪, 剪切速率均匀, 有极好的传热和温度控制, 末端效应可忽略, 高剪切速率下被测流体会产生二次流动, 边缘破裂易被抛出; ④振动式流变仪, 用于测量流体的弹性模量; ⑤拉伸流变仪, 用于测量流体的拉伸粘度; ⑥同轴圆筒(Couette)旋转流变仪, 按照旋转部件分为外圆筒固定内圆筒旋转型和外圆筒旋转内圆筒固定型两种, 外圆筒固定内圆筒旋转型在较低的旋转速率下, 就会产生二次流(Taylor 涡), 此时内外圆筒之间的流体流动不稳定, 进

收稿日期: 2009-12-23

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(50675202)

作者简介: 李良才(1984-), 男, 湖北黄石人, 主要从事流体剪切空化方面的研究. E-mail: liliangcai1984@163.com

通信联系人: 范毓润, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: yurunfan@zju.edu.cn

而发展为湍流;而外圆筒旋转内圆筒固定型可以避免 Taylor 涡的产生,流体流动为简单剪切的层流,内外圆筒间隙很小时,被测流体各部分剪切速率接近于均一,且剪切速率可以达到很高。因此更适合用来测量中低粘度、匀质流体的粘度,由于装料困难不适合熔体、糊剂和有较大颗粒的悬浮液。

强剪切流广泛存在于相对滑动的间隙内,如滑动轴承的轴颈与轴瓦之间润滑油的流动、活塞与缸套间隙液体薄膜的流动等。高剪切速率下,间隙内流体产生破裂,称为剪切空化。剪切空化将导致空泡侵蚀、润滑失效、缩短设备寿命等诸多问题。

为了研究剪切空化机理,郭关柱等^[3-4]研制出外圆筒旋转内圆筒固定 Couette 流变仪。该流变仪能产生剪切速率高达 $10^5/s$ 的剪切流,有效防止 Taylor 涡的产生;外圆筒采用有机玻璃、内圆筒采用铸型尼龙的特点使该流变仪具有可视化功能,有利于进行强剪切空化实验时观察空化初生现象。另外采用活塞缸实现对流变仪流体腔内压力的控制调节,可用于研究流体粘度和剪切空化随含气量的变化。进一步的研究发现新型 Couette 流变仪选用电机控制器面板所示输出力矩与真实值存在不可忽略的偏差。更换内圆筒进行重复实验时,难以保证两次试验温度、机械摩擦阻力等相同。本研究采用流体力学中无量纲参数概念来确定“相对修正力矩”,对 Couette 流变仪的电机输出总力矩进行修正,得到流体剪切工作段的阻力矩,无需更换内圆筒,以避免以上问题。

1 新型 Couette 流变仪力矩修正

1.1 新型 Couette 流变仪简介

新型 Couette 流变仪结构如图 1 所示,电机驱动外圆筒旋转产生剪切流;压力控制活塞缸用来调节流体腔内压力;精密压力传感器用来测量流变仪流体腔内的压力,并可检验实验装置的密封性能,温度传感器用于测量剪切层的瞬时温度,并记录、保存于计算机。通过电机和计算机的通讯接口,电机瞬时输出力矩将记录保存在计算机中。实验时,流体淹没内圆筒,工作段上、下方流体流动状态复杂,难以计算阻力。

新型 Couette 流变仪可以通过观察和摄影来识别流体在剪切时是否发生空化,测量流体在一定剪切速率和温度下的粘度值,研究流体空化初生的应力状态。

本研究选择 500cSt 二甲硅油作为实验流体^[5],它是典型的牛顿流体,且粘度适合小间隙同轴圆筒流变仪。

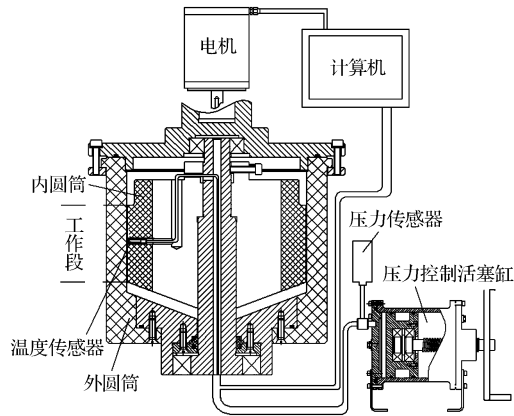


图1 新型 Couette 流变仪结构图

1.2 电机输出力矩真实值校正

新型 Couette 流变仪选用的电机型号为 123BL(3) E-400-30(ST),由珠海瑞合电气有限公司生产,该电机是一种无刷且具有伺服特性,另外还有转速可调、响应速度快、输出力矩采集、保护完善等优点。

由于通过计算机采集记录的电机输出力矩值(记为 M_s)并不一定是电机的输出力矩真实值(记为 M),它需要校正才能得出电机的输出力矩真实值。笔者在浙江计量所方圆检测中心采用恒定转速、恒定阻力矩的方法检测出电机输出力矩真实值和计算机所采集力矩值之间的差异,如图 2 所示。

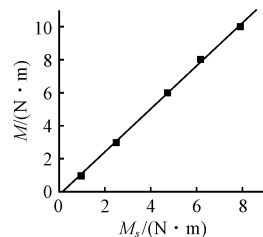


图2 电机输出力矩真实值和计算机所采集力矩值的关系

两者之间有极好的线性关系,通过线性拟合可得出:

$$M = -0.219 + 1.30 \cdot M_s \quad (1)$$

1.3 修正力矩的确定

修正力矩定义为电机输出力矩真实值与 Couette 流变仪工作段流体所受剪切力矩的差值,记为 ΔM 。有了修正力矩和电机的转速,可计算流体剪切时所受的剪切应力和粘度值。流体受到的剪切应力计算公式如下:

$$\tau = \frac{M - \Delta M}{2\pi R^2 L} \quad (2)$$

式中 R —外圆筒内半径; L —工作段高度。

流体受剪切时应变对时间的导数,称为剪切速率,用 $\dot{\gamma}$ 表示。对于牛顿流体,剪切应力与剪切速率成正比,则比例系数,即粘度为:

$$\tau = \dot{\gamma} \cdot \eta \quad (3)$$

在新型 Couette 流变仪工作段中:

$$\dot{\gamma} = \frac{2\pi Rn}{\varepsilon} \quad (4)$$

式中 n —电机转速; ε —内外圆筒之间的间隙。

由式(2)~式(4)可知,流体受剪切时的粘度计算公式为:

$$\eta = \frac{(M - \Delta M)\varepsilon}{(2\pi R)^2 RnL} \quad (5)$$

在新型 Couette 流变仪中,修正力矩包含系统机械摩擦力矩和剪切工作段上方、下方流体流动阻力矩。工作段上、下方的流动较为复杂,很难获得准确阻力。如忽略二甲基硅油表面张力,本研究则认为相对修正力矩应由流体惯性力和流体粘性力决定,雷诺数 Re 表征了特征惯性力和粘性力之比:

$$Re = \frac{VD\rho}{\eta} \quad (6)$$

式中 V —外圆筒内边缘的线速度, m/s ; D —外圆筒内径, m ; η —流体粘度, $Pa \cdot s$; ρ —流体的密度, kg/m^3 。

笔者用 Gemini-200 型旋转流变仪(英国 Bohlin)测得 500cSt 二甲基硅油在一个标准大气压下、剪切速率在 0~100 时的粘温关系,如图 3 所示。

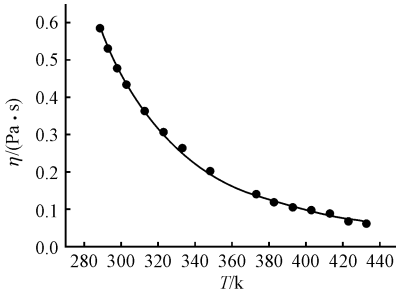


图 3 500cSt 二甲基硅油粘度随温度的关系

实验时选用直径 40 mm、锥角 5.4 的锥板,剪切速率范围为 0.01~100(该范围内,500cSt 二甲基硅油不受影响),温度误差控制在 0.1 °C 以内。

基于 Ering 模型^[6]拟合得到的 500cSt 二甲基硅油的粘度与温度关系式满足:

$$\eta = 0.0009 \cdot \exp(1869K/T) \quad (7)$$

将 Couette 流变仪测得的温度代入式(7),即可得此时剪切层流体的粘度。再将该粘度作为基准值代入式(5),即可得出相应温度、粘度时工作段力矩。由式(5)化简计算得修正力矩为:

$$\Delta M = M - \frac{\eta(2\pi R)^2 RnL}{\varepsilon} \quad (8)$$

相对修正力矩 $\frac{\Delta M}{M}$ 是无量纲数 Re 的函数,由实验确定,如图 4 所示。

可采用指数拟合得到相对修正力矩与雷诺数的关

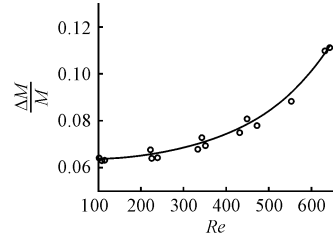


图 4 力矩修正值与雷诺数的关系

系为:

$$\frac{\Delta M}{M} = 0.061 + 0.00152 \exp(Re/183) \quad (9)$$

经校核,上式最大误差为 3.8%。

2 粘度测量误差计算

2.1 误差理论简述

对任何一物理量的测量都难免它与真实值存在的偏差。若测量一个真实值为 X 单位的量,其记录值为 x ,则把 $(x - X)$ 称为 X 的误差(即绝对误差),通常记为 e 。此值可为正,也可为负,但是应该始终认为该误差值 e 比 X 小得多,即 $|e| \ll |X|$ 。由上可知:

$$x = X + e = X(1 + f) \quad (10)$$

式中, $f = e/X$, 称为 X 相对误差。

当 $|e| \ll |X|$, 即 $|f| \ll 1$, 则:

$$\frac{e}{X} \approx \frac{e}{x} \quad (11)$$

在实际过程中, X 是无法得知的,一般通过多次测量求它的平均值 \bar{X} , \bar{X} 通常很接近 X , 则称 \bar{X} 为实测量的“最佳值”^[7]。另外一种获得 X 的途径是直接给出,比如设计尺寸等。

在间接测量中,待求量通常由函数 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 求出。通过测量 x_1, x_2, \dots, x_n 的值后,由上式计算得出 y 的数值。

若 x_1, x_2, \dots, x_n 误差分别为: $\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_n$, 那么 y 的误差为:

$$\delta y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) - f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (12)$$

式中 X_1, X_2, \dots, X_n — x_1, x_2, \dots, x_n 的真值。

将函数 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 按 Taylor 级数展开,略去二次以上高次项,得:

$$\begin{aligned} y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) &= f(X_1, X_2, \dots, X_n) + \\ &\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)_o (x_1 - X_1) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)_o (x_2 - X_2) + \dots + \\ &\left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)_o (x_n - X_n) = f(X_1, X_2, \dots, X_n) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)_o \delta x_1 + \\ &\left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)_o \delta x_2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)_o \delta x_n \end{aligned} \quad (13)$$

式中 $\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_n - x_1, x_2, \dots, x_n$ 的误差; $\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)_o$, $\left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)_o, \dots, \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)_o$ —函数 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 对 x_1, x_2, \dots, x_n 的偏导数在 $x_1 = X_1, x_2 = X_2, \dots, x_n = X_n$ 处的值。

将式(13)代入式(12),有:

$$\delta y = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)_o \delta x_1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)_o \delta x_2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)_o \delta x_n \quad (14)$$

上式表明函数 y 的总误差 δy 是各误差分量 δx_i 与相应偏导数 $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_o$ 之积的代数和。

2.2 新型 Couette 流变仪粘度测量误差计算

采用式(3)进行计算被测流体粘度时,需进行误差分析,以确定测量结果的可靠性。新型 Couette 流变仪采用的加工工艺,保证了内外圆筒的同轴度误差小于 0.02 mm,即内外圆筒间隙 ε (设计值为 0.5 mm) 最大误差为 0.02 mm;外圆筒内径 $R = 70$ mm,最大误差为 0.01 mm;剪切工作段 $L = 55$ mm,最大误差 0.02 mm;转速 n 为设定值,假定无误差。

采用式(9)进行力矩修正时,相对误差最大值为 0.038。记 $N = M - \Delta M$,则式(5)为:

$$\eta = \frac{N\varepsilon}{(2\pi R)^2 RnL} \quad (15)$$

由式(14)可知:

$$\delta\eta = \frac{\varepsilon}{4\pi^2 R^3 nL} \delta N + \frac{N}{4\pi^2 R^3 nL} \delta\varepsilon - \frac{3N\varepsilon}{4\pi^2 R^4 nL} \delta R - \frac{N\varepsilon}{4\pi^2 R^3 nL^2} \delta L$$

η 的相对误差为:

$$\frac{\delta\eta}{\eta} = \frac{\delta M}{M} + \frac{\delta\varepsilon}{\varepsilon} - 3 \frac{\delta R}{R} - \frac{\delta L}{L} \quad (16)$$

则:

$$\left| \frac{\delta\eta}{\eta} \right| \leq \left| \frac{\delta M}{M} \right| + \left| \frac{\delta\varepsilon}{\varepsilon} \right| + 3 \left| \frac{\delta R}{R} \right| + \left| \frac{\delta L}{L} \right| \quad (17)$$

式中, $\left| \frac{\delta M}{M} \right|$ 、 $\left| \frac{\delta\varepsilon}{\varepsilon} \right|$ 、 $\left| \frac{\delta R}{R} \right|$ 、 $\left| \frac{\delta L}{L} \right|$ 的最大值分别为

0.038、0.04、0.000 14、0.000 36。代入上式,即 $\frac{\delta\eta}{\eta}$ 的最大值为 0.078 8,通常用一个较小的量代替该最大误差,该值称为“最似然”值^[8]。“最似然”值由各个最大相对误差值的平方之和,再开方确定,即 $\frac{\delta\eta}{\eta}$ 的“最似然”值为:

$$\sqrt{0.038^2 + 0.04^2 + 9 \times 0.000 14^2 + 0.000 36^2} = 0.055 2$$

综上所述,通过对新型 Couette 流变仪测量粘度进行误差分析,可知该流变仪测量流体粘度时存在 5.52% 的相对误差。误差的主要来源为:①力矩修正误差;②制造内、外圆筒及相关零件时机床主轴跳动引起的内外圆筒间隙误差。

3 结束语

本研究通过对计算机采集的电机输出转矩进行校核,得出了电机输出转矩的真实值,结合 Gemini-200 型旋转流变仪(英国 Bohlin)测得 500cSt 二甲基硅油在一个大气压下的粘温关系,确定了新型 Couette 流变仪的相对修正力矩与雷诺数的关系,从而得出工作段的纯剪切力矩,有利于测量流体的粘度和流体受剪切发生空化时的应力状态。

对新型 Couette 流变仪测量粘度时进行误差分析,得出测量结果存在 5.52% 的相对误差,为以后进一步开展空化实验奠定了基础。

参考文献(References):

- [1] 尼尔生 L E. 聚物流变学[M]. 1 版. 北京:科学出版社, 1983.
- [2] CHRISTOPHER W M. Rheology: Principles Measurements and Applications[M]. Wiley-VCH Inc, 1993.
- [3] 郭关柱,范毓润,杨华勇. 可调压可视化微间隙 Couette 流变仪的研究及应用[J]. 机械工程学报, 2007, 43(7): 81-86.
- [4] 郭关柱,范毓润,杨华勇. 一种新的 Couette 流变仪的精度校核[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6): 147-153.
- [5] 黄文润. 硅油及二次加工品[M]. 2 版. 北京:化学工业出版社, 2004.
- [6] GLASSTONE S, LAIDLER K J. Eyring Theory of Rate Processes[M]. New York: McGraw-Hill, 1949.
- [7] 托平 J. 测试误差及处理方法[M]. 1 版. 北京:中国农业出版社, 1983.
- [8] 丁振良. 误差理论与数据处理[M]. 2 版. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2002.

[编辑:柴福莉]