

基于 Couette 流变仪的 0.1 ~ 0.5 MPa 压力下 液体粘度测量方法*

王 坤, 贾 震, 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: 为了研究使用 Couette 流变仪在 0.1 MPa ~ 0.5 MPa 压力范围内测量液体粘度的方法, 首先对流变仪进行了强度校核, 结果表明流变仪在低于 4.2 MPa 压力下可以安全工作。然后对如何通过电机输出力矩得到流变仪工作段力矩的问题做出了研究; 最后, 根据推导出的工作段力矩与所测液体粘度成正比的关系, 总结出了通过工作段力矩间接求得液体粘度的方法。误差分析结果表明该方法测量误差为 7% 左右。所做工作为以后利用 Couette 流变仪研究液体粘度与含气量的关系以及空化机理奠定了基础。

关键词: Couette 流变仪; 强度校核; 粘度测量; 力矩校核; 误差分析

中图分类号: TH71; TH122; TP202

文献标志码: A

文章编号: 1001 - 4551(2011)04 - 0407 - 04

Liquid viscosity measurement method in the pressure range of 0.1 ~ 0.5 MPa based on Couette rheometer

WANG Kun, JIA Zheng, FAN Yu-run

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

Abstract: In order to research the method of liquid viscosity measurement in the pressure range of 0.1 MPa ~ 0.5 MPa using the Couette rheometer, strength check of the rheometer was done firstly. The result shows that the rheometer can work safely in the pressure less than 4.2 MPa. Secondly, the problem of how to get the torque of the working section from the output torque of the motor was solved. Finally, according to the proportional relationship between the viscosity of liquid and the output torque of the working section, the way of computing the liquid viscosity through the torque of working section indirectly was summarized. The error analysis results show that, the relative error of viscosity measurement is about 7%. The work makes a good foundation for the research of the influence of the amount of air absorbed in the liquid to the viscosity of it and the mechanism of cavitation.

Key words: Couette rheometer; strength check; viscosity measurement; torque calibration; error analysis

0 引 言

流变仪是测量流体流变性质的仪器, 根据结构以及测量原理的不同分为锥板式、平行板式、同心圆筒式和毛细管式。在流体动力学中, Couette 流指的是粘性流体在粘性力作用下的层流流动。一般有两种方法可以得到 Couette 流: 一种是两平行平板之间的相对移动; 另外一种同心圆筒的相对转动。比较两种方法可知,

平板设计所占空间较大, 而且机械结构相对比较复杂。相对而言, 内外圆筒的同心比较易于实现, 这样可以使两圆筒的间隙保持均匀, 流体的流动状态是稳定的层流。因此, 在实际设计中经常使用的是第 2 种方法。

传统的 Couette 流变仪为内圆筒旋转, 外圆筒固定。这样设计的缺点是雷诺数比较高时, 流动会偏离纯剪切流, 形成二次流 (Taylor 涡)^[1]。通过分析发现, 外圆筒旋转、内圆筒固定的 Couette 流变仪即使在高雷

收稿日期: 2010 - 11 - 16

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (50675202)

作者简介: 王 坤 (1986 -), 男, 江苏盐城人, 主要从事流体剪切空化方面的研究. E-mail: wkzju@zju.edu.cn

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

诺数下流体的流动也是稳定的。针对这一分析,笔者所在课题组设计了新型可调压力 Couette 流变仪^[2],并且获得了发明专利^[3]。Couette 流变仪的外圆筒由透明的有机玻璃制成,内圆筒的材料为黑色铸型尼龙,郭关柱等^[4]对其进行了精度的校核,并利用它对水的空化现象进行了研究。

粘度是流变仪测量参数之一,在外界压力很高(100 MPa 以上)时,粘度会发生明显的变化,围绕这个问题有许多研究^[5-6]。在外界压力低于 1 MPa 时,粘度不会发生变化。但是这是指压力施加瞬间,液体内含有的气体量不变的情况。液体在不同压力下溶解空气达到平衡时,由于含气量不同,粘度也会发生变化。为了研究含气量对液体粘度的影响,有必要先得出在低于 1 MPa 下液体溶解气体达到平衡时,利用流变仪测量其粘度的方法。

二甲基硅油具有各种优异的特性,在工农业生产、国防工业、科学研究及医疗卫生等领域,都得了广泛的应用^[7-8]。在流变仪的测试中,硅油一般作为样品用来检验、校正流变仪。

本研究主要探讨基于 Couette 流变仪的 0.1 MPa ~ 0.5 MPa 压力下液体粘度测量方法。

1 Couette 流变仪

如图 1 所示, Couette 流变仪由同心圆筒、压力调节装置以及电机 3 部分组成。同心圆筒的内圆筒分为上、中、下三段,中间段与外圆筒间距仅为 0.5 mm。中间段是 Couette 流发生的地方,因此也是流变仪的实际工作段。工作段中部装有温度传感器,响应时间为 0.2 s。温度传感器通过数据采集装置与计算机相连,可以实时测量工作段液体的温度。压力调节装置由空心圆筒和活塞组成,推动手轮使活塞运动来控制流变仪内部压力。在空心圆筒左端装有压力传感器,装置

内压力值的大小可以由压力表直接读出。压力传感器可以测量的最大压力为 0.5 MPa,因此该 Couette 流变仪的测量范围为 0.1 MPa ~ 0.5 MPa。伺服电机驱动器与计算机相连,通过计算机可以控制电机转速。另外,电机厂家提供了电机输出力矩采集功能,通过力矩采集软件可以实时采集电机的输出力矩值。

2 强度校核

流变仪外圆筒材料为有机玻璃,其抗压能力相对较弱。而流变仪工作时需要承受一定的压力,所以有必要进行强度校核,得出流变仪所能承载的最高压力。共有 3 处需要进行强度校核:外圆筒顶端外圆筒盖与外圆筒连接处,外圆筒底部两个台阶处。台阶处主要考虑的是气体压力造成的剪切力的作用,根据流变仪的设计尺寸,两个剪切面的面积分别为: $A_1 = 0.015 \text{ m}^2$, $A_2 = 0.0042 \text{ m}^2$,对应的剪切作用力为: $F_1 = 0.0035p$, $F_2 = 0.0116p$,单位为 N。顶端外圆筒盖与外圆筒使用 8 个沿圆周均匀分布的螺栓连接,螺栓的型号为 M5,该连接处的作用力为 $F_3 = 0.0158p$,单位为 N。螺栓连接处预紧力很小,可以近似看作松连接。由上述分析可以列出强度校核方程为^[9]:

$$\frac{F_1}{A_1} \leq [\sigma_a], \frac{F_2}{A_2} \leq [\sigma_a], \frac{F_3}{8\pi R^2} \leq [\sigma_b] \quad (1)$$

式中: σ_a, σ_b —有机玻璃和螺栓的许用应力,查阅文献可以得到它们分别为 60 MPa 和 500 MPa。

选定安全系数为 4,将值代入式(1)中可得, $p \leq 4.2 \text{ MPa}$ 。流变仪压力传感器工作范围为 0.1 MPa ~ 0.5 MPa,完全在安全范围内。

3 粘度测量方法与精度分析

3.1 流变仪测量粘度原理

根据牛顿粘性定律有:

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (2)$$

式中: τ —剪切应力, η —测量液体的粘度, u —剪切速度。

由于工作段内外圆筒间隙很小,所以它们之间的流体速度可以看作沿径向线性分布,方程式(2)可以简化为:

$$\tau = \eta \frac{a \cdot 2\pi R}{\varepsilon} \quad (3)$$

式中: a —电机转速, R —外圆筒内半径, ε —工作段内外圆筒之间的间隙。

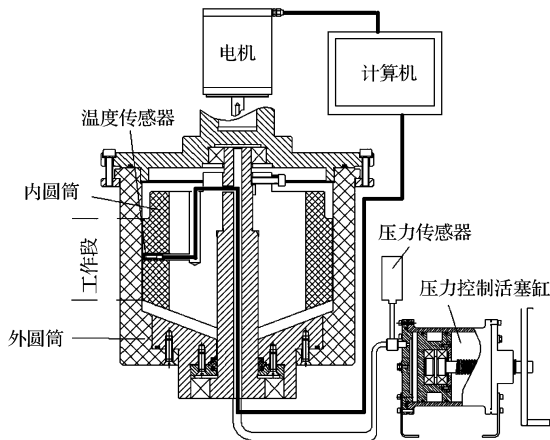


图 1 Couette 流变仪结构图

容易得到,流变仪工作段液体对外圆筒产生的力矩 M_r 为:

$$M_r = \tau \cdot 2\pi R \cdot L \cdot R \quad (4)$$

式中: L —工作段轴向上的距离。

将式(3)代入式(4)得到:

$$M_r = \frac{\eta a (2\pi R)^2 LR}{\varepsilon} \quad (5)$$

由式(5)可得:

$$\eta = \frac{M_r \varepsilon}{a (2\pi R)^2 LR} \quad (6)$$

式(6)中除了工作段力矩,所有量为已知量,工作段力矩与所测液体粘度成正比。因此,液体粘度可以通过测量流变仪工作段力矩间接求得。力矩采集软件采集得到的力矩是电机的输出力矩,需要经过力矩校正,才能得到工作段力矩。硅油常用于校正流变仪,以下力矩校正方法的研究使用的是 500cst 二甲基硅油。流变仪工作的压力范围为 0.1 MPa~0.5 MPa。

3.2 工作段力矩的求取

软件采集的电机输出力矩存在一个问题:采集的力矩值具有波动性,对采集得到的力矩需要先进行初步处理。电机以一定转速转动时,软件采集出来的力矩变化情况如图 2 所示(图中横轴表示时间,纵轴表示力矩)。通过观察发现力矩值波动的周期为一定值,大小为 4 s。因此,可以用对周期内的测量值取平均值的方法求得实际的力矩值。从图 2 中还可以发现,采集的力矩值会出现跳点,这些点对平均值有一定的影响。可以取几个周期的力矩值进行平均,这样跳点对平均值的贡献很小,并且取多个周期会使上跳点与下跳点相互抵消。

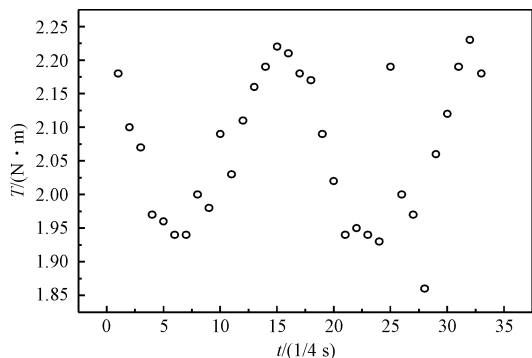


图2 采集力矩值波动图

分析流变仪进行液体粘度测量时电机输出力矩 M_c 的组成,它包括工作段消耗的力矩 M_r ,上下两段产生力矩 M_1 ,另外还有摩擦力矩 M_2 。由于使用 Couette 流变仪测量的液体一般而言密度都不是很大,例如水、硅油、液压油等。另外,使用流变仪测量液体粘度时,

需要的液体体积比较小,大约为 300 ml 左右,与流变仪重量相比,液体的重量可以忽略。因此,摩擦力矩可以通过测量流变仪的空转力矩(即在没有加装液体的情况下的电机输出力矩)得到。实验分别测得了电机转速一定情况下,流变仪内部压力不同时的空转力矩值,如图 3 所示。可以看出,在电机转速一定的情况下,空转力矩与压力的关系可以用直线进行拟合,最大误差为 2%,其对工作段力矩的相对误差不超过 0.5%。

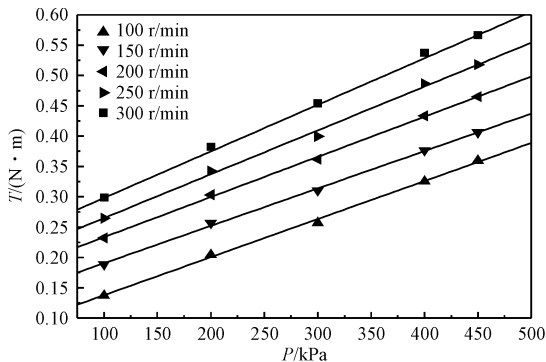


图3 不同电机转速下空转力矩与压力关系图

Gemini-200(Bohlin)流变仪可以精确测量液体在不同温度下的粘度值,其缺点为该流变仪的工作压力只能是常压(一个大气压)。但是,可以利用它来对 Couette 流变仪进行校正。如图 4 所示为 1 个大气压下,用 Gemini 流变仪测量得到的温度为 T 时 500cst 二甲基硅油的粘度值 η_c 。粘温关系可以用 Arrhenius 公式进行拟合为:

$$\eta_c = A e^{E/RT} \quad (7)$$

式中: T —绝对温度, R —气体常数, A 、 E —常数。

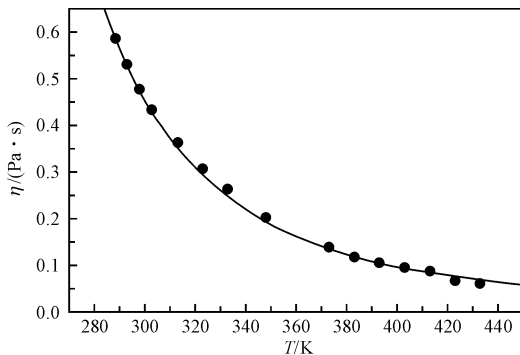


图4 一个大气压下 Gemini 流变仪测得的硅油的粘温关系图

对于 500cst 二甲基硅油,拟合得到: $A=0.0009 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $E=15531 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。流变仪工作时,工作段液体剪切发热,温度会升高。选定一个电机转速,在一个大气压下,用 Couette 流变仪测量出硅油温度变化时对应的电机输出力矩值 M_c 。由温度,根据式(7)可以计算出硅油粘度值,再根据式(5)可以求得相应一个大气压下的工作段力矩 M_r 。将 M_c 的值扣除工作段力矩 M_r 以

及摩擦力矩 M_2 , 得出常压下流变仪的上下段力矩。

由于工作段液体体积与上下段液体相比很小(约占 4%), 并且工作段间隙较小, 工作段液体很难向上、下两端散热, 因此上下两段液体温度在实验过程中基本不变。这样, 上下两段的力矩在工作段温度变化过程中不会发生变化。笔者测量了电机在 250 r/min 时, 用上述方法计算求得的一个大气压下的上下段力矩。流变仪工作了 10 min, 上下段力矩从 0.21 N·m 变化到 0.23 N·m。这样的变化, 与工作段力矩的相对误差不到 0.5%。压力的变化会造成液体粘度发生一定的改变而造成力矩的变化, 但是由于上下段液体的剪切速率比较小(工作段的 1/20 左右), 粘度的变化对上下段力矩的影响远远小于对工作段力矩的影响。因此可以认为上下段力矩 M_1 为一定值, 与工作段液体温度以及外界压力无关。

通过上面的分析可得, 电机转速一定时, 工作段力矩可以由下式求取:

$$M_r(T, p) = M_c(T, p) - M_1 - M_2(p) \quad (8)$$

式中: T —绝对温度, p —压力。

式中 M_c 由电机采集得到, M_1 为一定值, M_2 通过测量空转力矩直接得到。在工作段力矩求出的情况下, 根据式(6)可以求得液体的粘度。

3.3 测量误差分析

对于测量对象 y 可能与许多参数有关, 用 x_1, x_2, \dots, x_n 表示这些参数, 那么:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (9)$$

对于某一点 a_1, a_2, \dots, a_n , 测量值会存在误差, 假设该点的测量值是 b_1, b_2, \dots, b_n ^[10]。对式(9)在点 a_1, a_2, \dots, a_n 处泰勒展开, 略去高阶项可以得到:

$$\frac{\delta y}{y} = \frac{1}{y} \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_k} \right)_o \delta x_k \quad (10)$$

式中: δx_k — a_k 的测量误差, $\delta x_k = b_k - a_k$; $\delta y / y$ — y 在该点测量的相对误差, $\delta y / y = f(a_1, a_2, \dots, a_n) - f(b_1, b_2, \dots, b_n)$; $(\partial f / \partial x_k)_o$ — y 对 x_k 的偏导数在 a_1, a_2, \dots, a_n 处的值。

粘度测量误差主要来自仪器加工带来的尺寸误差以及求取工作段力矩的误差。尺寸误差与机床精度有关, Couette 流变仪工作段间隙为 0.5 mm, 加工误差为 0.02 mm; 外圆筒内半径 $R = 70$ mm, 误差为 0.01 mm; 工作段轴向距离 $L = 55$ mm, 误差 0.02 mm。根据式(6)可以计算粘度 η 测量的相对误差:

$$\left| \frac{\delta \eta}{\eta} \right| \leq \left| \frac{\delta M_r}{M_r} \right| + \left| \frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} \right| + 3 \left| \frac{\delta R}{R} \right| + \left| \frac{\delta L}{L} \right| \quad (11)$$

$\left| \frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} \right|$ 、 $\left| \frac{\delta R}{R} \right|$ 、 $\left| \frac{\delta L}{L} \right|$ 的值分别为 0.04、0.000 14、0.000 36。对于上述力矩校核的方法, 计算其带来的误差。根据式(10)有:

$$\left| \frac{\delta M_r}{M_r} \right| \leq \left| \frac{1}{M_r} \left(\frac{\partial M_r}{\partial M_c} \right)_o \delta M_c \right| + \left| \frac{1}{M_r} \left(\frac{\partial M_r}{\partial M_1} \right)_o \delta M_1 \right| + \left| \frac{1}{M_r} \left(\frac{\partial M_r}{\partial M_2} \right)_o \delta M_2 \right| \quad (12)$$

式中: $\partial M_r / \partial M_c = \partial M_r / \partial M_1 = \partial M_r / \partial M_2 = 1$, $|\delta M_1 / M_r| \leq 1\%$, $|\delta M_2 / M_r| \leq 0.5\%$, $|\delta M_c / M_r| \leq 1.5\%$ 。这样, $|\delta M_r / M_r| \leq 3\%$ 。因此, 粘度测量的相对误差 $|\delta \eta / \eta| \leq 7\%$ 。

4 结束语

本研究通过推导出的液体粘度与工作段力矩的关系式, 在解决了如何通过计算机直接采集到的电机输出力矩求得工作段力矩的问题后, 对使用 Couette 测量液体在 0.1 MPa ~ 0.5 MPa 压力下粘度的方法进行了研究。通过精度分析得出测量误差为 7%。

该研究表明使用 Couette 流变仪可以测量液体在 0.1 MPa ~ 0.5 MPa 压力下粘度。这为以后研究液体粘度与含气量的关系以及空化机理奠定了基础。

参考文献 (References):

- [1] ANDERECK C D, LIU S S, SWINNEY H L. Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders[J]. *Journal of Fluid mechanics*, 1986, 164(3): 155-183.
- [2] 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.
- [3] 范毓润, 郭关柱. 一种液体中的气体溶解度测试仪: 中国, ZL200610053819. X2006[P]. 2006-10-12.
- [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] BAIR S, WINER W O. The high shear stress rheology of liquid lubricants at pressures of 2 to 200 MPa[J]. *Journal of Tribology*, 1990(112): 246-252.
- [6] EVANS C R. The rheological properties of elastohydrodynamic lubricants[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1986, 200(C5): 303-312.
- [7] BARRY A J. Viscometric investigation of dimethylsiloxane polymers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1946(17): 1020-1024.
- [8] 黄文润. 硅油及二次加工品[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [9] 刘鸿文. 材料力学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [10] 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]