

DOI 10.13494/j.npe.20160022

王昊,段发阶,蒋佳佳,等. 应用于微重力流变实验的旋转流变仪[J]. 纳米技术与精密工程, 2016, 14(6): 460-466.

Wang Hao, Duan Fajie, Jiang Jiajia, et al. Rotational rheometer used for microgravity rheology experiments[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2016, 14(6): 460-466(in Chinese).

应用于微重力流变实验的旋转流变仪

王昊¹, 段发阶¹, 蒋佳佳¹, 王育人², 蓝鼎², 郑中玉²

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; 2. 中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100190)

摘要: 基于失重条件下的流变学实验需求, 针对国内流变学空间实验仪器的空白, 研制适用于航天发射和微重力实验的旋转流变仪. 以五相步进电机驱动旋转, 采用应变式扭矩传感器, 并增加预紧轴承提高旋转精度, 通过滑台驱动和光栅尺定位反馈完成液位厚度调整和拉伸运动. 剪切转速区间 0.01 ~ 1 000 r/min, 平均转速精度优于 1%, 实现了 150 mm/s 的高速拉伸和 0.5 μm 精度的样液厚度调整. 通过测量标准硅油取得地面实验数据, 得出该方案可行的结论. 相对于商用流变仪, 采用该方案的流变仪可进行长行程拉伸流变测量, 且结构坚固可靠、体积小、重量轻, 可实现发射入轨且成本低廉.

关键词: 旋转流变仪; 空间实验; 微重力; 平行板测量转子

中图分类号: TP216 文献标志码: A 文章编号: 1672-6030(2016)06-0460-07

Rotational Rheometer Used for Microgravity Rheology Experiments

Wang Hao¹, Duan Fajie¹, Jiang Jiajia¹, Wang Yuren², Lan Ding², Zheng Zhongyu²

(1. School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: To meet the demand of rheology experiments in zero-gravity condition and to fill the blank of space rheology instruments in China, a rotational rheometer, suitable for space launching and microgravity experiments, is designed. The rheometer used a five-phase step motor to drive the rotation and a strain gauge based torque sensor for measurement. Pre-tightening force was added on the bearing to improve the precision of spinning. By driving on a linear guide rail and the location feedback of a grating, it can adjust the sample thickness precisely while making fast stretches. The rotating rate ranges from 0.01 r/min to 1 000 r/min within the accuracy of 1%. The stretching speed reaches 150 mm/s. The thickness adjustment has 0.5 μm accuracy. A group of silicone oil samples was measured on the rheometer to test its function. And the conclusion is that this plan is feasible. Rheometer of this structure can achieve longer extensional rheology measurement. And it is sturdier, smaller and lighter than commercial purpose rheometers, making its launching mission feasible and cheap.

Keywords: rotational rheometer; space experiments; micro-gravity; parallel-plate measuring rotator

流变学是研究材料的流动和变形的科学, 是以实验为主要研究方法发展起来的, 介于力学、化学、物理与工程科学之间的新兴交叉学科^[1]. 在航天技术的支

持下, 微重力环境中的流变学实验成为可能. 美国空间动力研究院的 Bakhtiyarov 等^[2] 曾在美国国家航天局 (NASA) 的 KC-135 飞机抛物线飞行中测量了硅砂甘

收稿日期: 2016-08-20.

作者简介: 王昊(1990—)男, 硕士研究生.

通讯作者: 段发阶, 教授, fduan@tju.edu.cn.

油悬浮液的黏度特性,观察到从微重力到两倍重力范围内硅砂甘油悬浮液表观黏度的显著差异^[3].上述实验具有可在不同重力条件下取得数据的优点,但鉴于时间窗口有限、成本高昂,难以进行大量实验研究.

而发射流变实验设备进入太空轨道可获得持续的微重力环境,具有独特的优势. NASA 于 2015 年 5 月发表了其与麻省理工学院(MIT)合作进行的剪切历史拉伸流变实验(SHERE),该实验项目是将设备放在国际空间站(ISS)的微重力科学手套箱(MSG)内,由人工操作完成,实验设备为其自行研制的旋转拉伸流变仪,并附带视觉测量、温度控制等功能,取得了丰富的实验数据^[4-5],但该实验的流变仪只能测量拉伸流变.目前,由于加工、装配精度和传感技术水平的限制,国内尚无通用流变仪产品;而国外如 TA、HAAKE 等品牌的商用流变仪虽然测量精准,但不能经受航天发射的恶劣工况,操作方式和一些指标也不能满足微重力流变实验的需求,研制空间实验专用的流变仪对我国的微重力流变科学发展具有重要意义.本文介绍了流变测量过程及原理,分析了该测量方法的各项误差传递系数,提出了流变仪整体方案并对关键点进行分析,完成了地面实验以检验样机实际指标.

1 工作原理及测量需求

本流变仪的研制目标是:测量中高黏度的复杂流体在零重力下的流变特性,主要进行剪切黏度测量和执行拉伸黏度测量动作.剪切黏度测量(见图 1(a))是在两平行圆盘间注入被测液体后,驱动圆盘相对旋转,测量液体对圆盘产生的剪切应力并绘图,来观察液体的流变学属性;拉伸黏度测量(见图 1(b))是使两剪切平板间距迅速增大,平板间的黏液产生拉丝现象,由载物台上的力传感器感应拉力,摄像机记录拉丝形状,从而研究待测液体的拉伸流变特性.

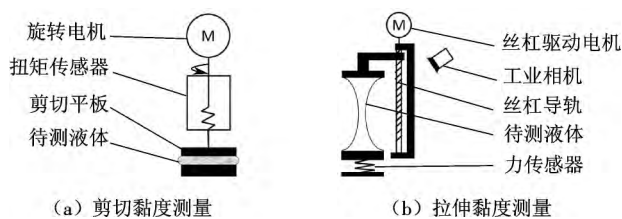


图 1 剪切黏度、拉伸黏度测量示意

Fig. 1 Diagrammatic sketch of shear viscosity and stretch viscosity measurement

剪切黏度测量中,本方案采用的平行板测量转子动力黏度公式与同轴圆筒测量转子和锥板测量转子相

同^[6],则转子动力黏度为

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{M_d}{\Omega} \frac{T}{M} \quad (1)$$

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2)$$

$$M = R/h \quad (3)$$

$$T = \frac{2}{\pi R^3} \quad (4)$$

式中: τ 为剪切应力, Pa; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; η 为动力黏度, $mPa \cdot s$; n 为转子转速, r/min ; M_d 为测得扭矩, $N \cdot m$; Ω 为角速度, rad/s ; T 为转子系统的剪切应力因子; M 为几何因子; R 为平行板测量转子外半径; h 为平板间隙,即样液厚度.

式(1)中的剪切速率 $\dot{\gamma}$ 采用最大速率 $\dot{\gamma}_{max}$, $\dot{\gamma}_{max}$ 可由平行板测量转子外半径 R 得出

$$\dot{\gamma}_{max} = M\Omega = R\Omega/h \quad (5)$$

平板间隙中的剪切速率不是单一值,而是一个很宽的范围,在板中心处为零,在边缘处最大,这对于牛顿流体的黏度测试不造成影响,但对于非牛顿流体的测试,剪切应力必须修正为

$$\tau' = \tau \left(\frac{3+n}{4} \right) \quad (6)$$

本流变仪需绘制出剪切力-转速曲线,并计算出液体动力黏度.拉伸黏度测量中,由外部温控载物台的力传感器测量拉伸应力,外部摄像机记录拉伸形状作为实验数据,流变仪仅负责执行拉伸动作.本文着重论述结构设计和指标实现,不对拉伸黏度测量的理论和实验过程做详细讨论.

2 设计指标及其相关性分析

剪切黏度测量包含剪切旋转、样液厚度调整、扭矩测量 3 个间接测量值.

对平行板测量转子扭矩公式计算进行误差合成,得到

$$d\eta = AdM_d + Bd h + Cd\Omega \quad (7)$$

各项误差传递系数为

$$A = \frac{2h}{\Omega\pi R} \quad (8)$$

$$B = \frac{2M_d}{\Omega\pi R} \quad (9)$$

$$C = -\frac{2M_d h}{\pi R^4} \Omega^{-2} \quad (10)$$

转子 $R = 10 \text{ mm}$,在设计测量范围内,取工作点转速 $n = 10 \text{ r/min}$, $M_d = 2 \text{ mN} \cdot \text{m}$, $h = 1500 \text{ } \mu\text{m}$,传递系数 $A = 9.12 \times 10^4$, $B = 1.22 \times 10^5$, $C = 1.91 \times 10^2$,可见各

测量要素对于总体误差的贡献为,样液厚度 > 扭矩 >> 转速. 样液厚度误差取决于剪切盘垂向位置的测量和调整误差,扭矩误差取决于扭矩传感器的选择和装配工艺,转速误差取决于驱动电机和电机驱动器性能.

另外也应考虑旋转跳动和装配造成的误差,旋转轴系的径向跳动将使剪切平板相对样品台平移,产生额外的剪切运动,是实际剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的干扰因素,它来源于轴承游隙和剪切转盘的安装同轴度误差;剪切转盘轴线与旋转轴系的同轴度误差会带来剪切转盘与载玻片不平行,导致剪切转盘一周内的样液厚度不均^[7].

在分析误差合成的基础上,依据国内工艺和技术水平提出了精度指标:剪切转盘轴向跳动(以下称轴跳) < 10 μm ,径向跳动(以下称径跳) < 10 μm ,剪切旋转需具有 1% 的转速稳定度,扭矩测量精度优于 0.1%,平板间隙定位精度 1 μm . 空间实验仪器在入轨后的改装成本极高,所以设定了 0.01 ~ 1 000 r/min 的大转速动态范围,剪切扭矩测量范围 $\pm 200 \text{ mN}\cdot\text{m}$,以适应未来多种转子形式、样品种类的实验需求.

拉伸黏度测量对于本流变仪的需求为执行高速长行程的拉伸动作,拉伸速度取决于丝杠电机转速和导轨丝杠的导程,拉伸行程取决于导轨长度. 针对无重力条件下,拉伸流变实验可形成地面实验难以达到的拉丝长度的特点,在满足规定的功耗、体积、重量等设计制约下,提出比商用流变仪更长的拉伸行程 200 mm,最大拉伸速度可达 150 mm/s.

3 机械结构与系统组成

流变仪机体结构由旋转测量头和支持其上下运动的直线位移台两大功能单元组成(见图2). 旋转测量

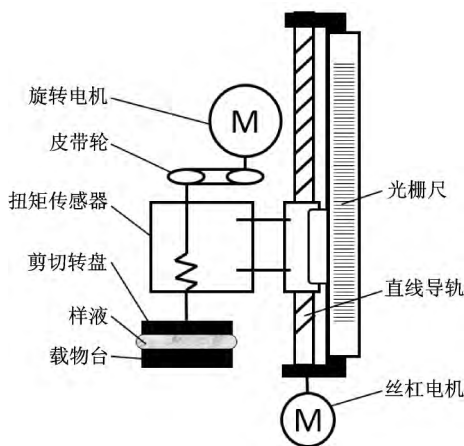


图2 流变仪机体结构示意图
Fig.2 Diagrammatic sketch of the rheometer

头包括旋转电机、皮带轮、扭矩传感器、剪切转盘. 旋转电机通过皮带传动驱动皮带轮,皮带轮带动扭矩传感器测量轴旋转,扭矩传感器测量端安装剪切转盘,并测量其受到的扭矩. 直线位移台包括直线导轨、丝杠电机和光栅尺. 直线导轨由丝杠电机驱动丝杠旋转,带动滑台上下运动,光栅尺对滑台的移动位置进行直接测量.

流变仪系统组成如图3所示,流变仪系统组成包括流变仪机体、电机驱动器、采集控制板和上位机. 两个电机驱动器分别驱动旋转电机和丝杠电机;采集控制板与上位机通讯,可采集扭矩传感器下传的模拟信号,对光栅尺增量脉冲信号计数,向电机驱动器发送转速频率,预处理原始数据后通过 RS485 传输协议上传.

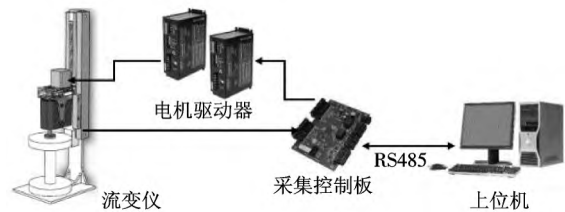


图3 流变仪系统组成
Fig.3 System composition of the rheometer

4 关键指标的实现及检验

4.1 旋转测量头

4.1.1 转速动态范围和转速精度

剪切转盘的转速范围和转速精度取决于电机的选择与控制器的设计,适合在目标转速范围内稳定控制的电机主要有伺服电机与步进电机. 伺服电机虽然可以由高精度编码器角度反馈组成的闭环系统实现指标要求,但基准源精度要求高,抗干扰设计复杂,编码器的抗冲击性能缺乏可靠参数,一系列困难都使航天载荷工程师尽量在步进电机上寻求潜力. 对于流变仪,步进电机的步进谐振是转速稳定度的主要威胁,减小步进电机振荡的成熟方法有:引入机械阻尼、增加细分驱动、合理选择电机等^[8]. 引入机械阻尼通常是在轴端加装制震器,但会增加系统尺寸、重量,减小输出转矩,而本文的传动机构为氟胶材料的皮带轮,其弹性阻尼特性也会对振荡起到缓冲作用;控制器采用了最高 1/250 细分度驱动,可显著降低绕组切换所引起的强迫振荡,扩大电机稳定运行的速度区间;对于单步以至细分后的单微步定位精度,只能通过选择工艺精密的

步进电机来保证,本方案选择了分辨率较高的五相步进电机,步距角为 0.72° ,静止精度为 0.05° 。

电机步距误差为 $0.05/0.72 = 6.94\%$,即决定了电机的瞬时速度误差达 6.94% ,这是加细分控制和机械阻尼等措施所无法改变的,而通常对角速度 Ω 所提的精度指标是对一个时间区间或角度区间内的平均角速度 $\bar{\Omega}$ 做评价,区间越小评价效果越好。对于流变测量,流动和变形都是物质在空间上的变化,以角度区间内的 $\bar{\Omega}$ 作为评价对象是合乎逻辑的,在 5° 扇形区间内 0.05° 的静止精度的定位误差为 1% ,而以晶振为参考的驱动时钟可视为完全准确,这意味着在 5° 扇形区间上 $\bar{\Omega}$ 相对目标角速度的精确度可达 1% 。前文计算的误差系数表明转速对误差的贡献相对低,对扭矩数据采取整周期平均算法后,忽略 5° 扇形区间以内角速度误差的影响,是符合误差分配原则的。

4.1.2 轴向跳动与径向跳动

由于空间制约,电机和扭矩传感器采用并行布置和皮带轮传动(见图2)。扭矩测量采用国产应变式扭矩传感器,该型传感器具有非接触的供电与信号传递特性,可对 $200 \text{ mN}\cdot\text{m}$ 以内的扭矩进行 0.1% 精度的测量,并输出模拟电压。

在只能采用分立部件进行整合的方案中,保证剪切旋转机构的机械精度是设计关键。如前文所述,剪切转盘轴系的径跳导致剪切速率 $\dot{\gamma}$ 误差,轴跳将导致待测液厚度 h 误差,所以需严格控制旋转轴系的轴跳和径跳。传统上,机械设计人员对轴两端的约束轴承施加预紧力来减小轴跳和径跳^[9],而在扭矩传感器内部,由于以下原因,约束轴承必须为非预紧配合:

(1) 施加预紧力将增加轴向压力,改变测量轴的受力状态,使其应变片产生误扭矩;

(2) 在测量端的轴承摩擦是干扰扭矩,施加预紧力将增加该处摩擦力。

本文选用的传感器轴跳达 $150 \mu\text{m}$,径跳 $50 \mu\text{m}$ 。为约束轴跳和径跳,可在传感器外部增加一对角接触轴承,并施加预紧力。测量端需避免增加额外摩擦力,只能在动力端的皮带轮两端增加预紧轴承(见图4)。

各个分立器件轴系为刚性连接,皮带轮轴承已对整体轴系完全约束,为避免测量轴受侧向外力,传感器外壳与机架的连接采用硬质泡沫聚氨酯填充,令其硬化后自然定位。

但是,测量轴动力端与皮带轮的同轴度误差将使测量轴做圆锥运动,同轴度误差将向下传递放大并转化为轴端径跳,而此时传感器的测量轴为过约束状态,造成测量端轴承的摩擦力不均甚至阻止转动,因此,要

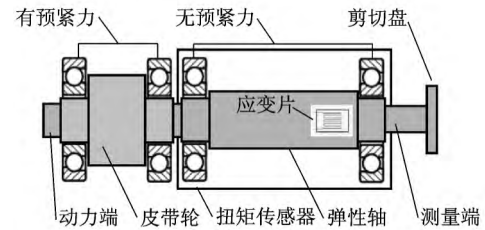


图4 扭矩传感器结构及其轴跳、径跳改善

Fig. 4 Torque sensor structure and its improvement method of axial play and radial runout

求测量轴与皮带轮的同轴度很高。本文皮带轮母线长 30 mm ,传感器测量轴长 140 mm ,由简单的相似三角型模型计算可知, $10 \mu\text{m}$ 的测量端径跳要求动力端与皮带轮同轴度优于 $2.14 \mu\text{m}$ 。

通常轴系的连接主要依赖联轴器,而各类联轴器均无法实现微米级的同轴度,所以本方案使用孔轴之间的过盈配合连接各个轴系(包括皮带轮轴、传感器测量轴和剪切转盘轴),并通过流程严格的温差装配法保证安装过程不伤害孔轴配合面。最终在预紧力下,轴跳消除至 $1 \mu\text{m}$ 以下,在轴端用千分表测量一周8个相位角 θ 的径跳值 r ,结果见表1,可保守估计极限径跳 $<5 \mu\text{m}$ 。

表1 整周径跳值

Tab. 1 Radial runout value of a whole period

相位角/ $^\circ$	径跳值/ μm	相位角/ $^\circ$	径跳值/ μm
0	0	180	4.5
45	1.0	225	3.3
90	2.1	270	2.0
135	3.5	315	1.2

4.2 直线位移台

直线位移台的功能包括:

- (1) 调整剪切黏度测量的平板间距,即液体厚度;
- (2) 对待测液进行高速拉伸,与外围摄像机结合进行拉伸黏度实验。

其中,平板间距的调整需要微米级高精度位移,而对速度没有要求;拉伸动作需要滑台以平均 150 mm/s 高速移动,而对移动精度要求较低。出于简化结构的需要,具有不同需求的两种功能必须在同一个直线导轨上实现,对导轨的重复定位精度和最高速度提出的需求已超出了国内外现有导轨的指标能力:高精度的直线导轨丝杠导程较小,额定最高速度不足,而高速直线导轨丝杠导程较大,重复定位精度低,且单步驱动步长较大,难以进行精密微调。

对流变仪功能需求进行分解可知:高精度位移区段为旋转测量头接近载玻片 5 mm 距离内的狭小行程范围,剩余行程为高速位移区段.由两功能区段相分离的特点,可对直线导轨的参数矛盾做折衷选择.本文选用丝杠导程为 4 mm,重复定位精度 $\pm 0.5 \mu\text{m}$,额定最高速度 80 mm/s,经长时间使用后,丝杠在高速运动区段磨损较大,绝对精度下降,而在低速运动段仍然保持良好.考虑到滚珠与滑道间的磨损可能导致的配合误差,通过在侧面加装光栅尺,测量滑台的绝对位置并反馈形成闭环控制,来避免位移调整精度随使用年限下降.

滑台的最高速度由电机的扭矩-转速曲线决定,扭矩不足将限制带负载加速能力,而高速下的扭矩下降可能导致根本无法克服导轨阻力,一般电机的扭矩是随转速线性下降的,而步进电机不遵循此规律,并具有扭矩平稳、峰值保持范围宽的优点.由 150 mm/s 的平均速度计算得到步进电机的最高速度应为 2 250 r/min,考虑加减速段,尽量在功耗允许的范围内,选用峰值扭矩可保持到 2 400 r/min 的步进电机.

步进电机的转速是离散的,由输入驱动器的脉冲频率定义可知,单次转速增幅过大对导轨寿命不利,甚至导致因扭矩不足带来的失步振荡,所以对步进电机控制采取了缓加速处理,使电机转速梯度上升.另外,电子系统的延迟和剪切测量头的惯性,使得测量头在高速运动下急停产生过冲,而采取缓减速可显著减小过冲.本系统中,停止前的速度遵循以下公式:

$$v = Kx \tag{11}$$

$$K = \frac{v_0}{x_0} \tag{12}$$

式中: K 为减速系数 s^{-1} ; x 为距终点长度,mm; v_0 为最高移动速度,mm/s; x_0 为减速段长度,本文取 $x_0 = 10 \text{ mm}$.

x 值根据调试经验取离散点,减速点如表 2 所示.

表 2 减速点经验取值表

Tab.2 Experiential points for velocity changing

减速点	x/mm
1	5.0
2	1.0
3	0.5
4	0.2
5	0.1

通过记录位移停止时光栅尺读数头的位移输出

值,减去目标位移值即可得到停止误差 u ,针对不同的 v_0 各测试 10 组停止误差,计算平均值 \bar{u} 及标准差 σ (见表 3).精密调整动作的 $v_0 \leq 1 \text{ mm/s}$,由测试数据估计调整精度优于 $0.5 \mu\text{m}$.

表 3 平均停止误差及其标准差

Tab.3 Mean error and standard deviation of stopping position

$v_0 / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$\bar{u} / \mu\text{m}$	$\sigma / \mu\text{m}$
150	10.40	4.15
100	6.50	2.16
50	3.30	1.19
1	0.18	0.16
0.1	0.05	0.10

5 实验数据和结果分析

在地面实验条件下,对 30 000 mPa·s, 60 000 mPa·s, 100 000 mPa·s 标准黏度硅油进行了测量,样液厚度为 1 500 μm ,转速由 1 r/min 梯次升至 15 r/min,在每一转速点待扭矩稳定后,对整周数据点取平均,测量结果见图 5.

图 5 中直线表示牛顿流体理论预测的各个黏度样液扭矩对转速的斜率,描点数据为实测扭矩.在低剪切率下,实测曲线与理论预测相一致,而在高转速下黏度下降,硅油呈现出非牛顿流体的剪切变稀效应^[10].事实上,标准黏度硅油,尤其是高黏度硅油也存在假塑性,是一种非牛顿流体^[11].

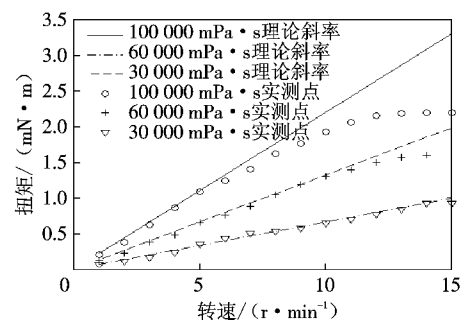


图 5 三种样液的转速-扭矩曲线

Fig.5 Plotting of the rotation rate vs. torque of three different samples

流变仪在这一转速范围内表现出较好的线性度,对 3 种样液进行 5 组测量,截取曲线未发生剪切变稀的线性部分进行拟合,回归计算得黏度值如表 4 所示.

表4 黏度测量值及统计量

Tab.4 Measured viscosity values and statistical quantities

标准样液 $\eta/$ (mPa·s)	测量结果 $\eta/$ (mPa·s)					$\bar{\eta}/$ (mPa·s)	$\sigma/$ (mPa·s)	$\xi/$ (mPa·s)	$(\xi/\bar{\eta})/ \%$	RSD/ %
	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次					
30 000	27 831	27 644	28 056	27 614	27 592	27 747	176	-2 253	7.5%	0.63%
60 000	56 926	57 326	58 004	56 907	57 964	57 425	480	-2 575	4.3%	0.84%
100 000	100 940	97 643	96 547	98 772	97 321	98 245	1 526	-1 755	1.8%	1.55%

分别对3种样液计算了表征该样液测量准确度的平均绝对误差 ξ 、平均相对误差 $\xi/\bar{\eta}$ 以及表征该样液测量值离散程度的相对标准偏差 RSD(也称变异系数 $C_v^{[12]}$) ,即

$$\xi = \frac{\sum_{i=1}^5 (\eta_i - \bar{\eta})}{5}$$

$$RSD = \frac{\sigma}{\bar{\eta}}$$

从低到高的3种黏度液体平均相对误差分别为7.5%、4.3%、1.8% ,3种黏度下相对标准偏差分别为0.63%、0.84%、1.55% ,说明测量数据的离散程度低于误差,仪器的重复性较好.3种黏度的测量值均偏小,可归为系统误差,其产生原因可能有:①传感器对静摩擦调零,而测量时轴承动摩擦小于静摩擦,致使扭矩测量值偏低;②流变仪机座的弹性变形导致样液厚度 h 小于光栅尺读数;③样液存在气泡,等效为样液变稀.

通过实验验证了流变仪的线性度和重复性,得出该方案基本可行的结论,而进一步的检验需要与外接温控载物台相配合,在确定的温度下测量黏度范围更广的样品,并与商用绝对流变仪的测试结果对比,进行标定.图6为流变仪工作实物照片.

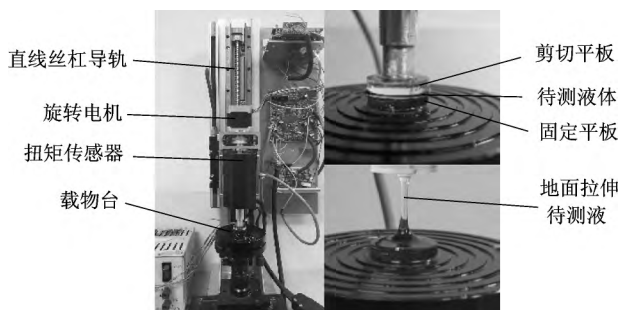


图6 流变仪工作实物照片

Fig.6 Photographs of rheometer measurement

经过实践测量,一些流变仪自身和实验过程存在的误差因素也显现出来.

仪器误差:①由于扭矩传感器对温度敏感,预热时

间或电机热量传递到测量轴上都可能影响工作温度,引入温漂误差;②扭矩传感器的自身轴承摩擦常使测量轴上有残余应力;③流变仪机架由于自身重力发生弹性变形,使实际样液厚度变小.

实验过程误差:①人工控制剪切时间和周数具有较强的随意性,样液会发生不同程度的剪切变稀;②长时间测量后,平板间样液可能有漏出,形成空隙;③加载样液时混入气泡,无法测定理想液体黏度;④载玻片和旋转头更换困难,平板洁净程度缺乏有效控制.

6 结 语

本文对流变仪方案思路和理论依据进行了介绍,解析了指标相关性和关键点,并通过实验对仪器各项指标进行了评估,测量3种样液并对结果进行分析,得出该方案可行的结论.以本文旋转流变仪为核心的微重力流变实验设备,可具备剪切流变和拉伸流变结合测量的能力,获得比SHERE更加丰富的实验数据.针对设计和使用中的问题提出的改进点为:①扭矩传感器带来主要的整合困难,如轴跳、径跳、残余应力和温漂,应针对流变仪需求定制应变片在轴承副外部的扭矩传感器,对轴承施加预紧力,并改善传感器的温度补偿;②增加软件功能来控制实验流程,排除人工实验的不确定因素;③优化剪切转盘和载物台的拆装,便于更换和清洗.

参考文献:

- [1] 王振东. 流变学的诞生和研究对象 [Z/OL]. <http://blog.sciencenet.cn/blog-205890-219864.html> 2009-03-12. Wang Zhendong. Origin and research object of rheology [Z/OL]. <http://blog.sciencenet.cn/blog-205890-219864.html> 2009-03-12 (in Chinese).
- [2] Bakhtiyarov S I, Overfelt R A. Rheological measurements in reduced gravity [J]. *Space Technology & Applications International*, 1999, 458(1): 830-835.
- [3] Hall N R, Logsdon K A, Magee K S. Shear history extensional rheology experiment: A proposed ISS experiment [Z]. NASA Technical Memorandum, 2007.

- [4] McKinley G H , Sridhar T. Filament stretching rheometry of complex fluids [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics* , 2002 , 34: 375-415.
- [5] 施拉姆. 实用流变测量学 [M]. 朱怀江, 译. 北京: 石油工业出版社, 2009.
Schramm G. *A Practical Approach to Rheology and Rheometry* [M]. Trans by Zhu Huaijiang. Beijing: Petroleum Industry Press , 2009(in Chinese) .
- [6] 汪逸群, 颜昌翔. 五相步进电机转速稳定度的分析与测试 [J]. 微计算机信息, 2010 , 26(11-4) : 156-158.
Wang Yiqun , Yan Changxiang. Analysis and test of five phase stepping motor rotation stability [J]. *Microcomputer Information* , 2010 , 26(11-4) : 156-158(in Chinese) .
- [7] 张 翊. 中高黏度范围的标准黏度液—甲基硅油 [J]. 上海计量测试, 2006 , 33(5) : 22-24.
Zhang Yi. Standard viscosity liquid of mid-high viscosity range—Methylsilicone oil [J]. *Shanghai Measurement* , 2006 , 33(5) : 22-24(in Chinese) .
- [8] 秦大同, 谢里阳. 现代机械设计手册. 第一卷 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
Qin Datong , Xie Liyang. *Modern Mechanical Design Manual. Volume 1* [M]. Beijing: Chemical Industry Press , 2011 (in Chinese) .
- [9] 费业泰. 误差理论与数据处理. 第五版 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
Fei Yetai. *Theory of Error and Data Processing. 5th Edition* [M]. Beijing: China Machine Press , 2004(in Chinese) .
- [10] Bakhtiyarov S I , Overfelt R A. Fluidized bed viscosity measurements in reduced gravity [J]. *Powder Technology* , 1998 , 99(1) : 53-59.
- [11] Morrison F A. *Understanding Rheology* [M]. USA: Oxford University Press , 2001.
- [12] Barnes H A , Nguyen Q D. Rotating vane rheometry: A review [J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* , 2001 , 98(1) : 1-14.

(责任编辑: 何静菁)