



实 验 教 学

流体黏度的实验研究

俞天伦, 马世红

(复旦大学 物理学系, 上海 200433)

摘 要: 基于落球法和毛细管法测定黏度的原理, 利用泊肃叶公式, 制作了测量流体黏度的装置. 更换不同规格的圆管, 黏度的测量范围为 $10^{-3} \sim 10^0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. 水和羧甲基纤维素钠溶液黏度的测量值与参考文献报道结果一致.

关键词: 黏度; 泊肃叶公式; 层流; 雷诺数

中图分类号: O351

文献标识码: A

文章编号: 1005-4642(2014)12-0001-05

1 引 言

液体的黏性系数简称黏度, 是描述液体内部摩擦性质的重要的物理量, 能够表征液体反抗形变的能力, 而只有在液体内部存在相对运动时才会表现. 在高等学校开设的大学物理实验课程中, 测量黏度的常用方法有落球法^[1]及毛细管法. 2 种方法各有利弊: 落球法对于小球的形状、质量以及放入量筒的位置要求较高, 限于较高黏度的液体, 例如蓖麻油; 毛细管法对于已知黏度的液体要求较高(温度、杂质等), 限于较低黏度的流体且易于被清洗, 例如水和酒精, 且对仪器的维护困难. 本文基于泊肃叶公式, 制作了简单的测量装置, 可以实现低成本、测量范围可调、可控精度比较高的黏度测量.

2 实验原理及其装置

2.1 黏度与雷诺数

黏滞力是流体受到剪应力变形或拉伸应力时所产生的阻力, 是黏性液体内部的流动阻力. 黏滞力主要来自分子间相互的吸引力.

剪切黏度: 2 个板块之间流体的层流剪切. 流体和移动边界之间的摩擦导致了流体剪切, 描述该行为强度的是流体的黏度. 在一般的平行流动中, 剪切应力 τ 正比于速度 u 梯度(图 1), 即

$$\tau = -\eta \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (1)$$

式中 η 即黏度^[2].

(1) 式假设流动是沿着平行线的层流状态, 并且垂直于流动方向的 y 轴指向最大剪切速度. 满足剪切应力-速度梯度线性关系方程的流体被称作“牛顿流体”.

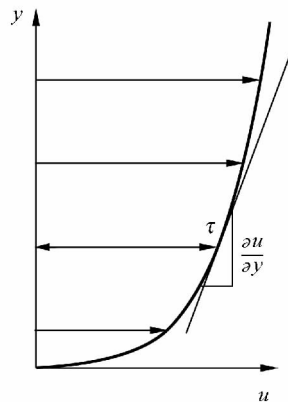


图 1 剪切黏度的示意图

雷诺数^[2]: 表征流体流动特性的一个重要参量. 雷诺数 R_e 定义为液体流动时的惯性力 $\frac{\rho v^2}{L}$ 和黏性力 $\frac{\eta v}{L^2}$ 之比, 其中 ρ 为液体密度, v 为液体流动速度, L 为液体特征长度, η 为黏度.

对于直圆管内雷诺数可以表达为 $R_e = \frac{\rho v d}{\eta}$, 其中 d 为圆管直径. 通常认为 R_e 在 2 300 以下是层流状态, 在其之上处于紊流以及湍流状态.

“第 8 届全国高等学校物理实验教学研讨会”论文

收稿日期: 2014-05-19; 修改日期: 2014-07-07

基金项目: 国家基础科学人才培养基金资助项目(No. J1103204, No. J0703310)

作者简介: 俞天伦(1993-), 男, 浙江杭州人, 复旦大学物理学系 2011 级本科学士.

指导教师: 马世红(1963-), 男, 河南温县人, 复旦大学物理学系教授, 博士, 从事功能超薄物理与器件、物理实验教学研究.

2.2 泊肃叶公式及其应用

泊肃叶公式^[3-4]: 牛顿流体在圆管内处于层流状态, L 为管长, p 为圆管两端压强差, a 为圆管半径(如图 2 所示), 则在管内的流量:

$$Q = \int_0^a 2\pi r v dr = \frac{\pi p a^4}{8\eta L}. \quad (2)$$

容器是圆柱体处于大气压下(如图 2 所示), 且水位下降足够慢(准静态过程), 使圆管中水流保持层流状态, 可以认为 $p = \rho g y$, 此时射出的水流应呈抛物线状且平稳, 则有:

$$Q = \frac{\pi \rho g y a^4}{8\eta L} = -A \frac{dy}{dt}, \quad (3)$$

其中 $A = \pi R^2$ 是容器的截面积. 求解(3)式可以得到:

$$y = y_0 \exp\left(-\frac{\rho g a^4}{8\eta L R^2} t\right). \quad (4)$$

对(4)式两边同时乘以容器的截面积 A , 得:

$$V = V_0 \exp\left(-\frac{\rho g a^4}{8\eta L R^2} t\right). \quad (5)$$

式中 V 为容器中的液体有效体积, 即图 2 中 y 所对应的体积, V_0 为初始有效体积.

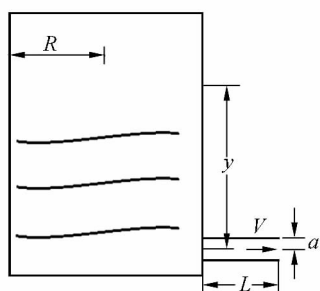


图 2 实验装置示意图

2.3 装置

实验装置如图 3 所示, 其主体是 2 L 的量筒(圆柱形容器), 在其侧壁上, 以 200 mL 处为中心, 开出直径约 3.8 mm 的圆孔, 之后接上长度适中的橡胶软管(内径 3.72 mm)并用 502 胶水固定. 圆管采用的是多种内径四氟乙烯管(内径分别为 1.2 mm, 1.6 mm, 2.0 mm, 2.8 mm), 剪裁合适的长度后, 利用 502 胶水固定在连接件内, 之后连接于软管中. 采用这种方案便于更换不同内径的流管以测量不同黏度范围的液体.

其余测量工具有: 秒表、直尺、温度计等. 实验中的待测液体为水和羧甲基纤维素纳(简称 CMC)溶液.



图 3 实验装置实物图

3 实验结果与讨论

选择一定规格的圆管组合连接于软管中(如图 4 所示结构), 将待测液体注入量筒中, 直到超过 2 L 刻度线 200~300 mL. 确认装置各连接处没有漏水后, 将软管按住稍向下倾斜, 使液体流出圆管并排除气泡. 可以观察到此时流出的水流呈抛物线状, 并且较为平稳, 射程随时间缓慢减小. 再次确认装置各连接处没有漏水, 调整圆管使其保持水平.

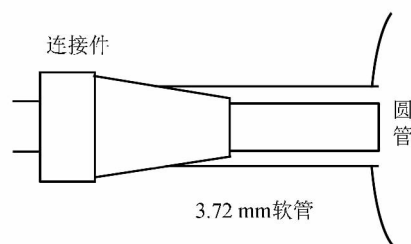


图 4 俯视结构示意图

当确认圆管中气泡排除后, 则可选择合适的液面位置开始计时. 根据液面下降的速度, 选择合适的体积间隔(一般选为最小刻度的 1~2 倍, 即 20 mL 或者 40 mL)并计时. 在至少采样 10 个点之后, 利用 $V = ae^{bt}$ 进行拟合并求出 η . 随后通过求导以及截面的换算, 推出速度 v 的范围, 则进一步可得到 R_c 的范围.

使用内径 $2a = (1.20 \pm 0.01)$ mm, 长度 $L = (14.90 \pm 0.01)$ cm 的四氟乙烯管, 水温 19.7°C 时, 拟合结果如图 5 所示.

通过(5)式, 可得 $\eta = \frac{\rho g a^4}{8LR^2} \frac{1}{b}$, 其中重力加速

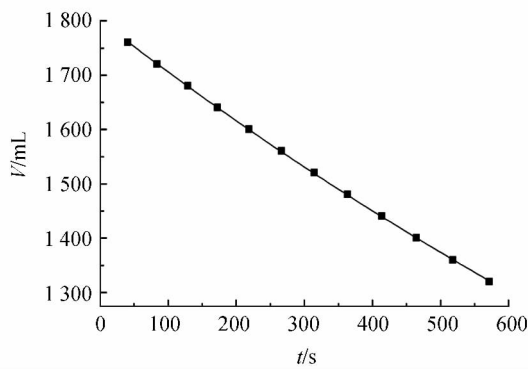


图 5 19.7 °C 下水的拟合结果

度 $g=(9.794 \pm 0.001) \text{ m/s}^2$,量筒直径通过游标卡尺进行多次测量后取平均,得到 $2R=(8.73 \pm 0.03) \text{ cm}$.

算出 $\eta=1.032 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,不确定度分别由重力加速度 g 、流管半径 a 、流管长度 L 、量筒半径 R 以及拟合参量 b 的不确定度贡献:

$$\left[\frac{u(\eta)}{\eta}\right]^2 = \left[\frac{u(\rho)}{\rho}\right]^2 + 4\left[\frac{u(a)}{a}\right]^2 + \left[\frac{u(L)}{L}\right]^2 + 2\left[\frac{u(R)}{R}\right]^2 + \left[\frac{u(b)}{b}\right]^2,$$

得到 $u(\eta)=0.018 \text{ mPa} \cdot \text{s}$.

参考值可以查表^[5]得到温度为整数时的黏度.对于温度不是整数的情况,采用加权平均的方式得到参考值.例如:实际水温为 19.7 °C,水在 19 °C 和 20 °C 时理论黏度为 1.029 9 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 和 1.005 0 $\text{mPa} \cdot \text{s}$,计算参考值时前者权重为 0.3,后者权重为 0.7,得到参考值 $\eta_{\text{参考}} =$

1.012 5 $\text{mPa} \cdot \text{s}$.测量值相比参考值,相对偏差 $\Delta=1.9\%$.

进一步处理后,得到圆管中速度 v 的范围在 0.59~0.85 m/s ,从而分别得到由 $\eta_{\text{测量}}$ 计算的 R_e 范围在 690~985,由 $\eta_{\text{参考}}$ 计算的 R_e 范围在 700~995.

对 19.7 °C 做 3 次测量,得到的黏度相差不超过 6%,具有可重复性.通过 3 次的结果得到平均值 $\eta=(1.06 \pm 0.04) \text{ mPa} \cdot \text{s}$,相对偏差 $\Delta=4.7\%$.

对水所有实际采样过程中,通过拟合的 $V=ae^{kt}$ 处理,得到水面下降速度在 10^{-4} m/s 量级;圆管中水流速度在 10^{-1} m/s 量级, R_e 均在 1 000 以下,属于层流,排除了流体处于紊流或者湍流状态.如果处于紊流(湍流)状态,测得的黏度将是与流速、环境因素等相关的表征值而非物质的本征性质.

表 1 中所测得的黏度 $\eta_{\text{测量}}$ 相比理论值 $\eta_{\text{参考}}$ 有一定的偏差,产生偏差的原因可能是:

- 1) 所用的四氟乙烯管并非理想的直线型,有小量的弯曲,使水流在经过弯曲处时动能减损,导致测量结果偏大;
- 2) 水流在从量筒进入圆管的一小段位置,其实是突变界面的流动,这一小段的水流受到的局部阻力较大,导致测量结果偏大;
- 3) 水中含有杂质,影响不可知;
- 4) 量筒、圆管的材料,热膨胀系数在 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 量级,在测量的温度范围可以忽略不计.

表 1 不同温度下水的黏度测量结果

$t/^\circ\text{C}$	$2a/\text{mm}$	L/cm	$\eta/(\text{mPa} \cdot \text{s})$		E_r	R_e	
			测量值	参考值		由 $\eta_{\text{测量}}$ 计算	由 $\eta_{\text{参考}}$ 计算
12.5	1.20	14.80	1.26±0.04	1.219 6	+3.3%	460~700	455~695
15.6	1.20	14.80	1.16±0.04	1.122 8	+3.3%	680~820	670~810
17.0	1.20	14.90	1.12±0.04	1.082 8	+3.4%	630~870	635~880
18.0	1.20	14.90	1.10±0.04	1.055 9	+4.1%	650~920	655~930
19.7	1.20	14.90	1.06±0.04	1.012 5	+4.7%	690~985	700~995

与此同时,笔者发现在测量的温度范围内,水的黏度 η 与绝对温度的倒数 $1/T$ 有较好的线性关系,根据文献^[6],水的黏度与绝对温度的关系,存在 Eyring 模型: $\eta=Ae^{E_0/RT}$ (其中 A 为与液体特性有关的常量, E_0 为液体的活化能, R 是气体摩尔常量, T 是绝对温度).在温度变化较小时,

常用 $\eta=A+\frac{B}{T}$ 的近似经验公式.拟合结果(图 6)与该式相符合,相关系数 $r^2 \sim 0.992$.其中的物理机制是黏滞力的本质是分子间相互作用力,温度升高后,水分子之间的引力、斥力都会降低,但是引力下降更快,最终表现为内聚力降低,宏观上表

现为黏度下降。

使用这套简易测量装置,在这 5 个温度下均分别做过多次测量,误差最大不超过 7%,最接近参考值的测量值误差均不超过 2%,平均误差不超过 5%。

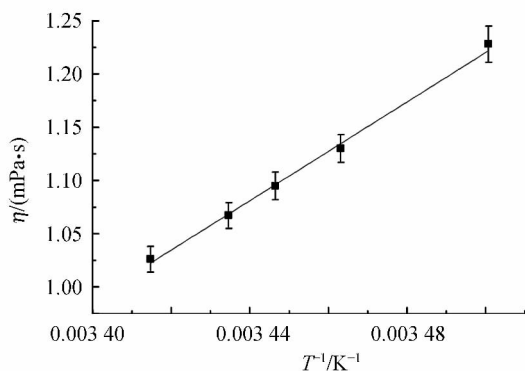


图 6 水的黏度与温度的关系

羧甲基纤维素钠(CMC)是一种常用的高分子聚合物增稠剂。在测量的质量分数范围内,均属于牛顿流体[未出现无管虹吸^[7]现象且符合由牛顿流体推出的(5)式]。在配置溶液时,发现:1)其密度比水大(例如在 2 500 mL 水中加入约 20 g CMC,当充分溶胀后,溶液体积会减少约 50 mL); 2)完全溶胀后,分布不均匀,在容器底部溶质稍多于液面处(在移液时可以观察到底部的黏度稍大)。所以计算密度时,引入 3%的不确定度,且质量分数一列指的是测量时的 CMC 溶液质量分数不超过该值(但偏差不大)。

CMC 溶液的黏度测量结果如表 2 所示。

表 2 CMC 溶液的黏度测量结果

φ	$t/^\circ\text{C}$	$2a/\text{mm}$	L/cm	$\eta_{\text{测量}}/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	R_e
0.05%	12.5	1.20	14.80	2.09 ± 0.07	200~260
0.2%	11.5	1.60	10.80	4.95 ± 0.17	90~150
0.5%	18.0	2.00	10.70	12.4 ± 0.4	34~46
0.8%	18.0	2.00	10.70	22.8 ± 0.7	10~13
1.3%	18.0	2.80	10.80	61.1 ± 2.1	3.4~5.0
1.5%	17.0	2.80	10.80	93 ± 3	1.9~2.3
1.6%	18.0	2.80	10.80	103 ± 3	1.3~1.8
2.2%	17.0	3.72	4.50	234 ± 7	0.8~2.0

测量出的黏度与文献[8]中测出的黏度均在同一量级上,且在相应质量分数点均偏小。由于

制作过程、杂质含量等不同,其 CMC 相同质量分数的溶液黏度会有变化。基于这两点以及水的结果误差大小,可判断测得 CMC 溶液的黏度是可信的。

考察 R_e 范围可以发现,除了 2.2% 质量分数的 R_e 范围,其余点有质量分数越高, R_e 越小的趋势,这是符合理论的。由于 $R_e = \frac{\rho v d}{\eta}$, 溶液的质量分数越高,黏度也越高,如果圆管的规格变化不大,那么流速 v 也要相应降低,则 R_e 就会越来越小。但是对于 2.2% 质量分数的溶液,出于采样时间的考虑,测量时直接采用 3.72 mm 内径的橡胶软管作为流管,规格与前几组所用的圆管相差较大,导致流速 v 在一定时间范围内大于 1.6% 质量分数的流速且超过了黏度 η 的影响,使 R_e 的范围打破之前降低的趋势。

在测量范围内,排除温度差异相对较大的 0.05% 及 0.2% 这 2 个点后,发现其余的 CMC 溶液的黏度与质量分数有指数增长的规律(图 7)。根据文献[9],部分多种组分的液体的黏度可以由 Lobe 法经验公式给出:

$$\frac{\eta}{\rho} = \sum_i \gamma_i \frac{\eta_i}{\rho_i} \exp\left(\sum_j \frac{\alpha_j \gamma_j}{RT}\right),$$

其中, η 为黏度, ρ 为密度, γ 为体积分数, α 为特性黏度参量, R 为气体摩尔常量, T 为绝对温度。

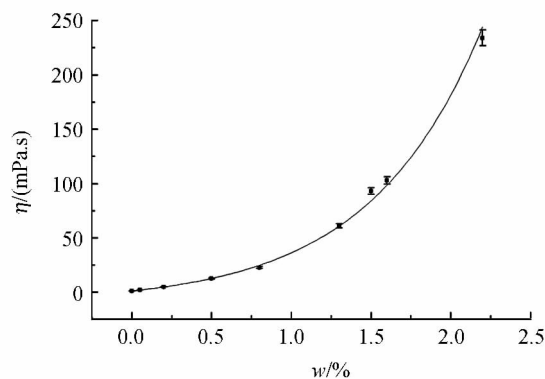


图 7 CMC 溶液的黏度与质量分数的关系

测量到的 CMC 溶液的黏度,在小范围内的质量分数变化下,满足简单的近似经验公式 $\eta = A + Be^{C\varphi}$ (其中 φ 为 CMC 的质量分数), 相关系数 $r^2 \sim 0.997$ 。其物理机制与 CMC 分子对水分子的吸附、CMC 分子的团簇作用与扩散运动等因素相关,目前没有完善的理论能包含不同种类的溶液。

4 结束语

使用自制的简易装置,测量了不同温度下水的黏度,与理论值相比误差较小.在测量温度范围内,水的黏度与绝对温度的倒数呈线性关系.用该装置测量了保持牛顿流体性质范围内的不同质量分数的 CMC 溶液,其黏度与质量分数呈指数增长.该装置通过更换不同规格的圆管,在满足被测液体是层流状态且流速较低条件下,使测量时间范围不过长(一般在 5~15 min),实现了 $10^{-3} \sim 10^0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 量级的黏度测量.

参考文献:

- [1] 赵敏,强晓明.落球法测液体黏度的改进[J].物理实验,2011,31(11):25-26.
- [2] 欧特尔 H.普朗特流体力学基础[M].北京:清华大学出版社,1982:237-239.
- [3] 波蒂斯 A M,杨 H D.大学物理实验——伯克利物理实验[M].北京:科学出版社,1982:187-191.
- [4] 钱钧,惠王伟,张春玲,等.毛细管法测量液体黏度实验再设计[J].物理实验,2012,32(6):1-4.
- [5] 刘光启,马连湘,刘杰.化学化工物性数据手册[M].北京:化学工业出版社,2002:1-12.
- [6] 娄彦敏,刘娟红,周晓平,等.温度对水的粘度和扩散系数影响的研究[J].西南师范大学学报(自然科学版),2009,34(6):34-39.
- [7] 马宗豪.定常流场下非牛顿流体在波壁管内的减阻特性[D].大连:大连理工大学,2009:1-2.
- [8] 孙兰芬.甲基纤维素、羧甲基纤维素钠、羟乙基纤维素溶液粘度的测定[J].河南大学学报(自然科学版),1987(4):64.
- [9] 董景山,李敬.流体热物理性质的计算[M].北京:清华大学出版社,1982:237-239.
- [10] 沈元华,陆申龙.基础物理实验[M].北京:高等教育出版社,2003:119-122.
- [11] 贾玉润,王公治,凌佩玲.大学物理实验[M].上海:复旦大学出版社,1987:141-142.

Experimental study of the viscosity of fluids

YU Tian-lun, MA Shi-hong

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Based on the falling ball and capillary tube methods, an apparatus was designed to measure the viscosity of fluids with Poiseuille formula. By changing the circular tubes, the measurement range of $10^{-3} \sim 10^0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ could be achieved. The viscosity of water and CMC liquor at a certain temperature was measured, the results were in accordance with those reported in references.

Key words: viscosity; Poiseuille formula; laminar flow; Reynolds number

[责任编辑:任德香]