

流体粘滞系数 的实验研究

报告人：俞天伦

指导老师：马世红

复旦大学

常用的方法

- 落球法：适用于粘度较高的液体

- (蓖麻油) $\eta \sim 10^{-1} Pa \cdot s$

- 毛细管法：乌氏粘度计适用于粘度较低的流体，两种液体作对比

- (酒精与水的对比) $\eta \sim 10^{-3} Pa \cdot s$

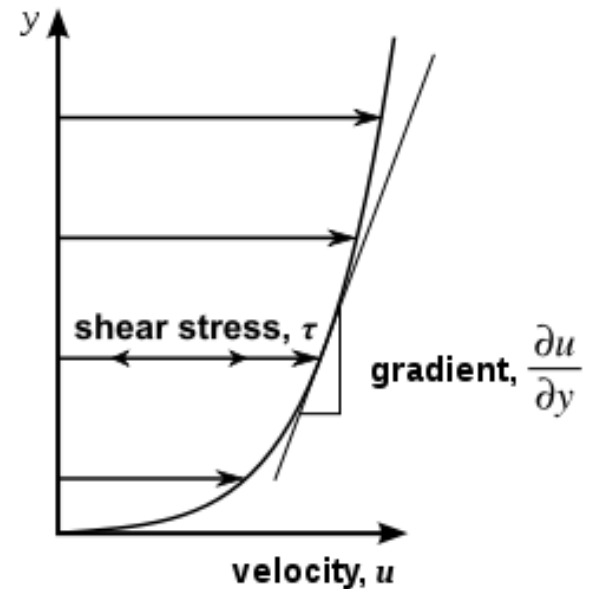
一种新方法：能够直观测量粘度较低（甚至普适）的流体，而不需要对比其他液体的粘度。

粘滞系数（粘度）

- 分子间的相互作用
- 牛顿流体

$$F = -\eta A \frac{dv}{dy}$$

- 层流
- 非牛顿流体 $F \sim dv/dy$ 为非线性关系，存在多种模型

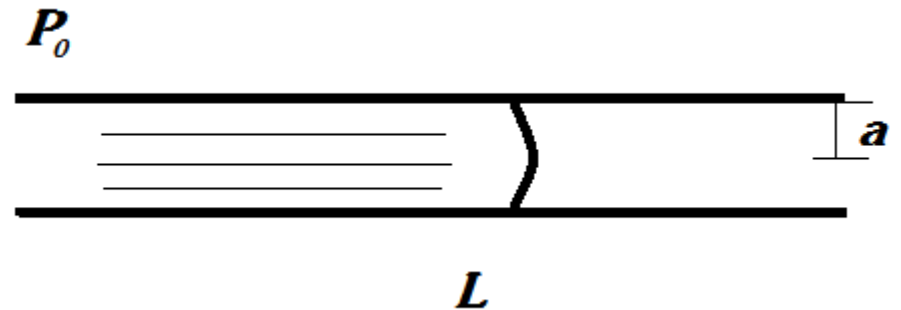


原理

泊肃叶公式：牛顿流体在圆形管道内流动，其流量

$$Q = \frac{\pi p_0 a^4}{8\eta L} = Sv$$

适用条件：层流



原理

- 检验方式：

雷诺数 $Re < 2300$ ，层流；

2300~4000，过渡状态；

4000~10000紊流， > 10000 湍流

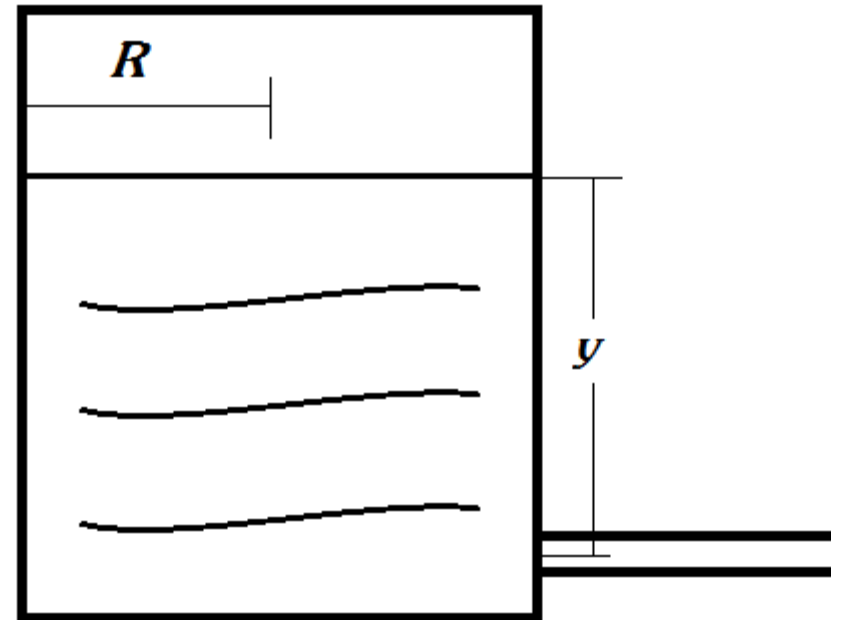
$$Re = \frac{\rho v d}{\eta}$$

原理

- 当容器是圆柱体，流管是圆管，且容器内水位下降足够慢，可以认为 $p_0 = \rho gy$ 时，有：

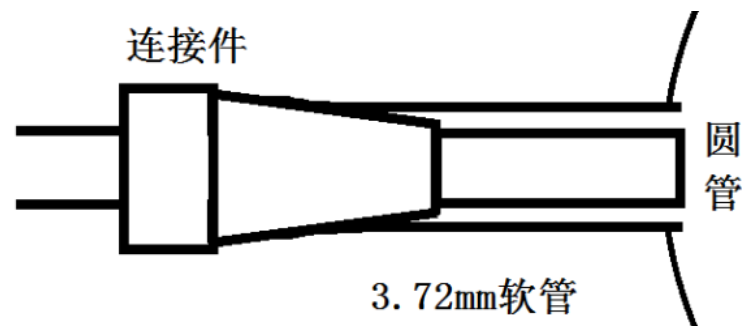
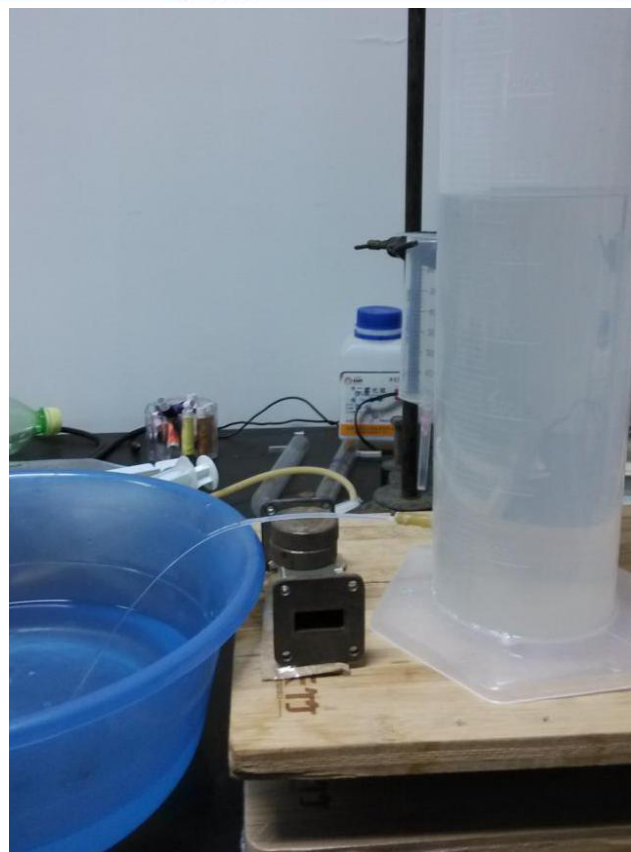
$$Q = \frac{\pi \rho g y a^4}{8 \eta L} = -A \frac{dy}{dt}$$

$$\Rightarrow y = y_0 e^{-\frac{\rho g a^4}{8 \eta L R^2} t}$$

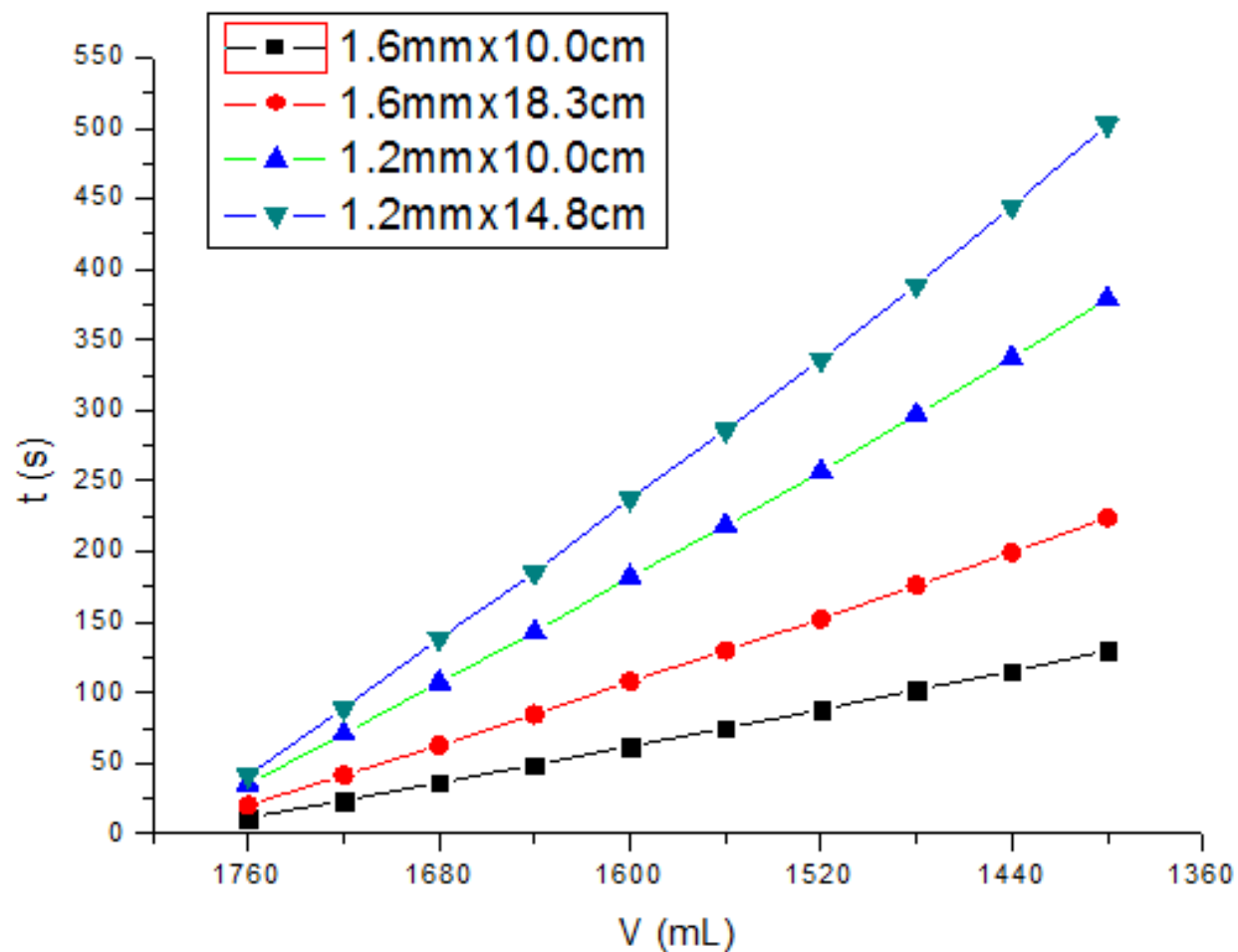


实验过程

- 采用2000mL的量筒，在侧壁上打孔插入软管。
- 采用不同内径、长度的圆管作对比
- 采用 $V=V_0e^{Rt}$ 拟合
- 对象：水，CMC-Na溶液



多种流管比较



多种流管比较

直径mm 长度cm	1.6 10.3	1.6 18.1	1.2 10	1.2 14.8
$\eta/10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$	1.303 ± 0.067	1.233 ± 0.077	1.220 ± 0.054	1.156 ± 0.043
相对误差	+16.0%	+9.8%	+8.7%	+2.9%
雷诺数 Re	1500~1900	990~1270	840~1100	680~900
理论雷诺数 Re	1800~2270	1100~1400	920~1200	670~890

较细流管比较

直径mm 长度cm	0.98 10	0.9 10	1.2 14.8
$\eta/10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$	1.328 ± 0.075	1.402 ± 0.083	1.268 ± 0.042
相对误差	+7.4%	+13.4%	+3.4%
雷诺数Re	430~490	300~340	460~700
理论雷诺数Re	460~526	340~450	455~695

影响因素

- 超出层流状态，沿径向和轴向都有速度分量，阻力变大
- 水分子与管壁的碰撞，外摩擦
- 起始端突变截面（尾端效应），局部阻力
- 圆管几何形状、制作工艺等

不同温度下水的粘度

t/°C ±0.1°C	$\eta_{\text{测量}}$ / mPa·s	$\eta_{\text{参考}}$ / mPa·s	相对 误差	由 $\eta_{\text{测量}}$ 计算的 Re范围
12.5	1.258 ± 0.042	1.2196	+3.1%	460~700
15.6	1.156 ± 0.043	1.1228	+2.9%	680~820
17.0	1.121 ± 0.040	1.0828	+3.5%	630~870
18.0	1.097 ± 0.038	1.0559	+3.9%	650~920
19.7	1.055 ± 0.037	1.0125	+4.2%	690~985

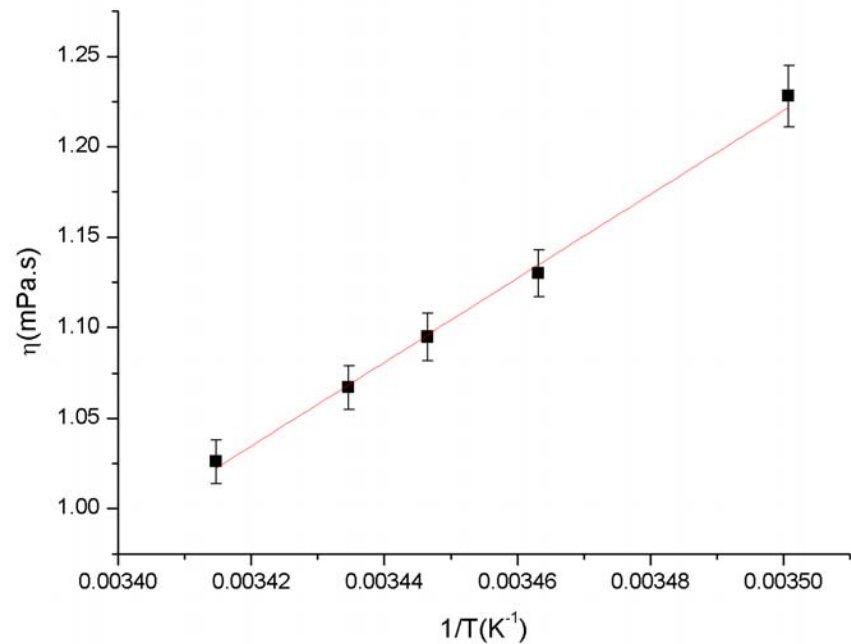
不同温度下水的粘度

- 水的粘度与温度符合：

$$\eta = A + \frac{B}{T}$$

- Eyring模型： $\eta = Ae^{\frac{E_0}{RT}}$

- 粘滞力的本质：分子相互作用。水分子引力与排斥力的竞争结果。



CMC-Na溶液粘度的测量

- CMC是一种水溶性高分子聚合物，对水溶液有增稠作用
- 非高粘CMC制得的溶液，一般认为3%是非牛顿流体转变点
- 溶液配制方法：加入适量水，在水面上平铺一层CMC，再缓慢加入适量水，平铺一层CMC，重复；静置数日，取上层清液。

CMC溶液

质量分数	$\eta_{\text{测量}}/\text{mPa}\cdot\text{s}$	Re范围
0.05%	2.09 ± 0.07	200~260
0.2%	4.95 ± 0.17	90~150
0.5%	12.4 ± 0.4	34~46
0.8%	22.8 ± 0.7	10~13
1.3%	61.1 ± 2.1	3.4~5.0
1.5%	93.2 ± 3.1	1.9~2.3
1.6%	102.8 ± 3.4	1.3~1.8
2.2%	234 ± 7.3	0.8~2.0

CMC溶液

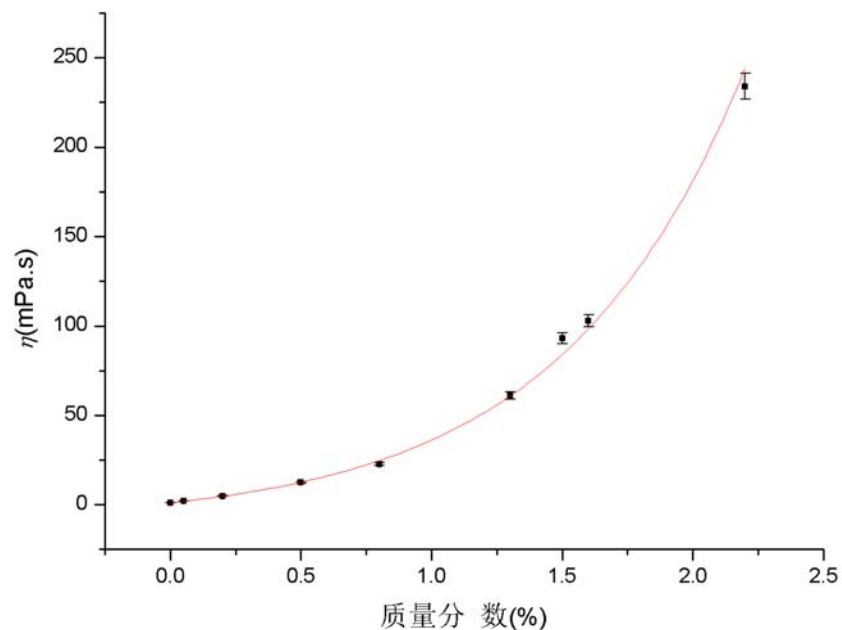
- 近似满足经验公式：

$$\eta = A + Be^{C\phi}$$

- Lobe法：

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

- 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



总结

- 从基本出发
- 从简单入手
- 耐心比较、改进

参考资料

- [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] (德) H.欧特尔等, 普朗特流体力学基础[M], 北京: 清华大学出版社, 1982。237~239
- [3] (美) A.M.波蒂斯, H.D.杨, 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, 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: 大连理工大学硕士学位论文, 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, 1987: 64
- [9] 童景山, 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