

液体的粘度 计算和测量

苏尔皇 编著

国防工业出版社

液体的粘度计算和测量

苏尔皇 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书较全面地介绍有关液体粘度的基本知识和液体粘度的各种半经验计算方法，对目前实用的粘度测定法，包括细管法、旋转法、重力法、平动法、振动法和光干涉法，从理论基础到具体装置都有较全面的论述。在每种装置之后有操作方法的介绍并对装置的选用加以评述。

本书可作为有关工程技术人员的实用参考资料，亦可作为高等院校有关专业的师生参考教材。

液体的粘度计算和测量

苏尔皇 编著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张5³/₄ 125千字

1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷 印数：0,001—3,910册

统一书号：15034·3061 定价：1.20元

序 言

粘度是液体的重要物理性质之一，它反映液体流动行为的特征。有许多工程技术需要关于液体粘度的知识和数据，例如：机械工业中的冷却和润滑摩擦和磨损控制，液力和液压系统性能计算和调节，石油工业中对减压蒸馏塔的操作进行控制，各类油品的传输和调合，造纸和纺织工业中的淀粉转换过程，上胶、涂料、过滤和沉降过程控制，印刷业中的油墨生产，高分子工业生产过程中的原料检验、中间产品质量管理、生产工艺过程控制、成品质量检验等等，都需通过粘度信息方能实现。所以，关于液体粘度的测定及其方法和精确程度，以及粘度的计算和估算等，均日益受到工程界的重视。

估算也可以说是预言，是基于已掌握了的知识的关系，需要用内插或外推法得到。知识的关系可分为三种情况：

1. 纯经验的联系，这种联系基于推断，一般是不可靠的，甚至是任意的，因而意义不大。

2. 纯理论的联系，至少到目前为止还没有发展到能够实用的水平。

3. 部分经验的，但是是以理论为基础的联系，这种半经验的联系是最有实用效果的、可靠的。

因此，在粘度估算方面，本书将只介绍关于粘度的半经验的估算方法。事实上，哪怕是最最粗略的估算，也会给设计或管理指明方向，从而带来可观的经济效益。

测定液体粘度的方法和设备将直接决定生产耗费。粘度数据能否及时获得或有些误差，都有可能影响企业的利益或研究成败。而能否正确选择测定方法和设备要取决于许多因素，其中最主要的是对于粘度测量理论和设备的构造原理及使用方法的了解程度，因此本书还准备对这一方面作较为详细的讨论。

本书承许耀铭教授审阅并提出许多有益的建议。作者特在此深表谢意。

编著者希望这本小书能对各方面的读者在粘度知识方面有所裨益，但限于水平和经验，加上工作经历的局限性，有不足和错误之处恳望读者与以指正。

编著者

目 录

第一章 液体的粘度	1
1.1 纯液体、溶液和胶体	1
1.2 液体的粘性	3
1.3 液体的粘度	4
1.4 影响液体粘度的因素	9
1.5 液体按粘度和流变特性的分类	13
第二章 液体粘度计算	22
2.1 据微观分子参数计算纯液体和稀薄溶液的粘度	22
2.2 据宏观统计参数计算纯液体和稀薄溶液的粘度	31
2.3 高压下纯液体和稀薄溶液的粘度计算	39
2.4 温度接近沸点时纯液体的粘度计算	40
2.5 熔融粘度计算	42
2.6 普通溶液的粘度计算	42
2.7 高分子溶液专用的粘度算式	47
2.8 极性溶液的粘度计算	49
2.9 电解液的粘度计算	49
2.10 悬浮液的粘度计算	51
2.11 乳化液的粘度计算	55
2.12 泡沫液的粘度计算	56
第三章 粘度测量和粘度计	57
3.1 粘度测量	57
3.2 数据处理	60
3.3 粘度计的质量指标	66
3.4 粘度计概况	69
第四章 出流法	72
4.1 细管粘度计的测粘依据	72

4.2	玻璃细管粘度计	79
4.3	加压细管粘度计	98
4.4	连续细管粘度计	100
4.5	用于非牛顿液体的细管粘度计	102
4.6	短管粘度计和小孔粘度计	105
第五章 旋转法		112
5.1	圆筒旋转粘度计的测粘依据	112
5.2	双重圆筒旋转粘度计	120
5.3	单一圆筒旋转粘度计	125
5.4	用于非牛顿液体的旋转粘度计	128
第六章 重力法		137
6.1	落球粘度计的测粘依据	137
6.2	落球粘度计	140
6.3	转落球粘度计	144
6.4	落圆柱粘度计	150
6.5	滑落圆柱粘度计	152
6.6	其它型的落体粘度计	154
6.7	升泡粘度计	157
第七章 平动法		159
7.1	带形粘度计	159
7.2	滑板粘度计	160
7.3	倾斜板粘度计	161
7.4	汽缸油测粘计	162
7.5	平行板粘度计	164
第八章 振动法和光干涉法		167
8.1	低频摆动粘度计	167
8.2	振动片粘度计	170
8.3	扭转振动粘度计	173
8.4	冲击粘度计	174
外国人名汉译表		175
参考文献		178

第一章 液体的粘度

1.1 纯液体、溶液和胶体

液体通常是指所有的液态物质,包括纯液体、溶液和胶体。

纯液体是液态的成分纯粹的单一的物质。在一个大气压下能使纯液体沸腾的温度称为沸点,记作 T_b , 例如水的沸点是 $373.15\text{K}(100^\circ\text{C})$ 。即将发生能使液态和汽态的密度一样,难以区分二者的现象叫做临界状态,水的临界温度是 $T_c = 647.15\text{K}(374^\circ\text{C})$, 临界压力是 $p_c = 218\text{atm}$ ●。按古德别尔格法,通常,不管纯液体的种类如何,其沸点 $T_b(\text{K})$ 和临界温度 $T_c(\text{K})$ 之比 T_r 大致等于常数:

$$T_r = T_b/T_c = 2/3$$

溶液是由能互相溶解的溶质和溶剂组成的单相均匀体系。含量较多的称为溶剂,较少的称为溶质。溶质在溶剂中分散成单个分子或离子。溶液可分为普通溶液(其溶质分子不具有偶极矩,也不带电荷),极性溶液(其溶质分子有较大的偶极矩)和电解液(其溶质分子带有电荷)等三种。

溶质在溶液中含量的多少用浓度来说明,浓度有以下几种表示方法:

1. 体积浓度

溶液体积中含有的溶质体积的百分数称体积浓度。

2. 重量浓度或质量浓度

溶液重量或质量中含有的溶质重量或质量的百分数称重

● $1\text{atm} = 101325\text{Pa}$ 。

量浓度或质量浓度。

3. 体积重量浓度或体积质量浓度

溶液单位体积中含有的溶质重量或质量数称为体积重量浓度或体积质量浓度。

4. 克分子浓度或称莫尔浓度

一升溶液中所含溶质的克分子数，即莫尔数，称为克分子浓度或莫尔浓度。

若一定量的物质，其质量以克表示，在数值上等于其分子量，则此一定的量叫做一克分子，或称一莫尔。以克分子为单位表示的物质数量叫做克分子数，或称莫尔数。

5. 质量克分子浓度或称质量莫尔浓度

一千克质量的溶剂中所含溶质的克分子数称为质量克分子浓度，或称质量莫尔浓度。

6. 当量浓度

一升溶液中所含溶质的克当量数称为当量浓度。

当量 = 原子量 / 化合价，若一定量的物质，其质量以克表示，在数值上等于其当量，则此一定的量叫做一克当量。以克当量为单位表示的物质数量叫做克当量数。

胶体是由互相不溶解的分散质和分散剂组成的多相不均匀体系。分散质在胶体中份量较少，它分散成微粒状的间断相，分散剂份量较多，它表现为连续相。工业上常见的胶体有以下几种类型：

分散质	分散剂	名称
固态	液态	悬浮液
液态	液态	乳化液
气态	液态	泡沫液

分散质在分散剂中含量的多少，习惯上均用体积或重量

或质量浓度表示。

1.2 液体的粘性

液体流动时，液体质点间产生相对运动，液体微团被迫变形，于是液体中就产生了抵抗变形速度的内应力，这种性质称为粘性。粘性所起的作用是阻滞微团的变形速度而不是阻止变形。粘性实质上是液体分子微观作用的宏观表现。粘性产生的原因有二：一是分子不规则运动的动量交换，二是相邻分子间的固着力。

1. 分子不规则运动的动量交换形成的切应力

由于分子的不规则运动，速度较快的分子迁移到慢部分时，其原有的较大的动量就传给了速度较慢的部分，使慢部分获得要其加速的内应力。而当慢部分的分子迁移到快部分时，其原有的较小的动量就使快部分受到要其减速的内应力。在快慢两部分的分界面上，这些内应力就表现为切应力。

2. 分子间的固着力形成的切应力

分子间的固着力包括吸引力和分子链纠缠在一起后要使其脱开所需要的力。固着力力图将速度不同的相邻质点结为一体，当质点显示相对运动时，固着力就形成为使快部分减速和使慢部分加速的快慢界面上的切应力。

对液体来说，其分子间的距离和其分子的大小为同一数量级。当液体缓慢运动时，其分子的不规则运动主要是在其平衡位置附近的振动，故由分子不规则运动的动量交换所形成的切应力很小。液体内的切应力主要来自分子间的固着力。而固着力又与液体的分子量、克分子体积、分子的形状、极化能力、离子化能力等因素有关，故这些因素将决定液体的粘性。

还可用以下的假说来解释粘性的成因：

液体的微观结构处于气体和晶体之间，围绕液体的单个分子，其周围分布着类似晶体结构的确定数目的相邻分子，但在其晶格中有所缺空，此缺空又可被相邻的分子移来补充，因而离此单个分子越远，分子间的相对位置就越显得紊乱，以致于在一定的距离之外就显得像气体分子似地杂乱无章。当相邻的分子移来补充缺空时，又可反过来看成是缺空在自由运动。液体的扩散过程可看成是分子进入缺空形成新的缺空的连续过程。当液体不受外力作用时，缺空的转移各向均等。当有外力作用时，缺空的转移即向某一定向发生，于是就形成流动。流动的难易程度就表现为粘性。

对溶液或胶体。例如高分子聚合物溶液，它们的分子呈长线状、分枝状或网状分散于溶剂中。其力学特性取决于其链状分子上每个环节与环节间的作用情况。高分子聚合物溶液流动时，其分子像履带样地一节一节顺序地补入缺空，因此其分子链越长，或支链很多，或分子链的刚度增加都能使粘性增大。

有些液体在运动时能表现出粘性和弹性。其长长的分子链不仅像履带似地运动，还像绷紧了的弦似地作复杂的振动；其分子环节补入缺空的时间很慢，几乎和我们观察的时间呈同一数量级。补入缺空的运动呈现为粘性，而链节间绷紧了的弦似的状态就显示出弹性。

1.3 液体的粘度

液体的粘性将使液体流动时其内部各点的运动速度大小不等，以液体沿如图 1-1 所示的平行平板间的流动情形为例，如上平板以速度 V 向右运动，则下平板固定不动。设液体能

润湿平板，于是紧贴于上平板上的液体质点粘附于上平板上，其速度与上平板相同，紧贴于下平板上的液体质点粘附于下平板上，其速度为零。如速度 V 不大，流动为层流，则中间的液体质点的速度按线性分布。当运动较快的液体层在运动较慢的液体层上滑过时，两层间由于粘性就产生内摩擦力的作用，形成切应力。

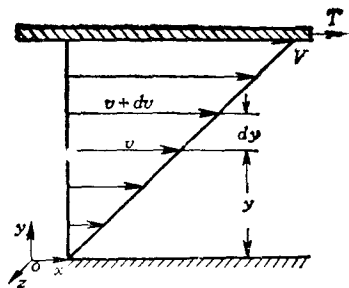


图 1-1

切应力 τ 与剪切率 $\dot{\gamma} = dv/dy$ 间的关系方程，称为本构方程。对上述流动，其本构方程通常都写成如下的表达形式

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} = \eta \dot{\gamma} \quad (1-1)$$

此式称为牛顿内摩擦定律，式中的剪切率 $\dot{\gamma}$ 又称速度梯度。式中的 η 称为液体的粘度系数，（或动力粘度、牛顿粘度）也可简称之为粘度。它可用来表示液体粘性大小的程度。

1. 纯液体的粘度

对纯液体，粘度的常用单位有下列几种：

（1）粘度 η

粘度 η 即为式（1-1）中之 η ，它可直接表示内摩擦力即切应力的大小。由式可知，当 $\dot{\gamma} = dv/dy = 1s^{-1}$ 时，在数值上 η 等于 τ ，它之所以又称为动力粘度是因为在它的量纲中有动力学的要素力的缘故。动力粘度在国际单位制、绝对单位制和工程单位制中的单位分别是帕斯卡·秒（ $Pa \cdot s = N \cdot s/m^2$ ）；

泊 ($P = \text{dyn} \cdot \text{s} / \text{cm}^2 = \text{g} / \text{cm} \cdot \text{s}$) 和千克力·秒每平方米 ($\text{kgf} \cdot \text{s} / \text{m}^2$), 其相互间的换算关系如表 1-1 所示。

表 1-1

$\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	P	cP	$\text{kgf} \cdot \text{s} / \text{m}^2$
1	1	10	1000	0.101973
0.1	0.1	1	100	0.0101973
0.001	0.001	0.01	1	0.000101973
9.80665	9.80665	98.065	9806.5	1

还常引用粘度的倒数 $\varphi = 1/\eta$, φ 称为流动度, 其单位用 rhe 表示: $1 \text{rhe} = 1\text{P}^{-1}$

(2) 运动粘度 ν

运动粘度 ν 为粘度 η 与密度 ρ 的比值

$$\nu = \eta / \rho$$

运动粘度 ν 可看作是液体在其自重作用下对流动的抵抗能力, 但这一意义十分含糊, 它不能象 η 一样直接表示液体切应力的大小。由于在理论分析和计算中常常要碰到动力粘度与密度的比值, 为方便起见才采用运动粘度这个单位来代替 η/ρ 。它之所以称为运动粘度, 是因为在它的量纲中只有运动学的要素长度和时间的缘故。运动粘度在国际单位制、绝对单位制和工程单位制中的单位分别是二次方米每秒 (m^2/s); 斯 ($\text{St} = \text{cm}^2/\text{s} = \text{P} \cdot \text{cm}^3/\text{g}$) 和二次方厘米每秒 (cm^2/s), 其相互间的换算关系如表 1-2 所示。

(3) 相对粘度 η_r

$$\eta_r = \frac{\text{试样的粘度}}{\text{某种标准液在某温度下的粘度}}$$

表 1-2

m^2/s	S	cSt
1	1×10^4	1×10^6
1×10^{-4}	1	100
1×10^{-6}	1×10^{-2}	1

表 1-3

名称	符号	单位	采用国家	换算关系
动力粘度	η	厘泊cP	苏	$\nu = \eta / \rho$
运动粘度	ν	厘斯cSt	中, 苏, 英, 美, 日	
恩氏度	$^{\circ}E$	度	中, 欧洲	当 $1.35 \leq ^{\circ}E \leq 3.2$ 时 $\nu = 8.0^{\circ}E - \frac{8.64}{^{\circ}E}$ 当 $3.2 \leq ^{\circ}E \leq 32$ 时 $\nu = 7.31^{\circ}E - \frac{6.31}{^{\circ}E}$ 当 $^{\circ}E > 32$ 时 $\nu = 7.6^{\circ}E - \frac{4}{^{\circ}E}$
恩氏秒	"E	秒	苏, 德, 瑞典, 挪威	$\nu = 1.435"E - (322/"E)$
国际赛氏秒	SUS	秒	美	当 $32 s \leq SUS \leq 100 s$ 时 $\nu = 0.226SUS - (195/SUS)$ 当 $SUS > 100 s$ 时 $\nu = 0.220SUS - (135/SUS)$
赛氏-弗氏秒	SFS	秒	美	当 $25 s \leq SFS \leq 40 s$ 时 $\nu = 2.24SFS - (184/SFS)$ 当 $SFS > 40 s$ 时 $\nu = 2.16SFS - (60/SFS)$
商用雷氏秒	"R	秒	英	当 $34 s \leq "R \leq 100 s$ 时 $\nu = 0.26"R - \frac{179}{"R}$ 当 $"R > 100 s$ 时 $\nu = 0.247"R - \frac{50}{"R}$

(续)

名称	符号	单位	采用国家	换算关系
海军用雷氏秒	"RA	秒	美	当 $32 \text{ s} \leq "RA \leq 90 \text{ s}$ 时 $v = 2.46 "RA - \frac{100}{"RA}$ 当 $"RA > 90 \text{ s}$ 时 $v = 2.45 "RA$
巴氏度	°B	度	法	$v = 4850 / "B$

相对粘度 η_r 一般只用于比较液体流动性能的场所。

(4) 条件粘度

条件粘度是使用特定的粘度计在规定条件下测得的粘度。其单位很多，常用的有恩氏度、恩氏秒、国际赛氏秒等等。

各种粘度的单位名称、符号、采用的国家及其与运动粘度间的换算关系见表 1-3。

2. 溶液的粘度

对溶液除需用纯液体的各种粘度单位外，还需引入以下概念：

(1) 粘度比 η_r

$$\eta_r = \eta / \eta_0$$

此处 η 是溶液的粘度， η_0 是溶剂的粘度，这种度量方法对高分子溶液特别适用。

(2) 比粘度 $\eta_{r,p}$

$$\eta_{r,p} = \eta_r - 1 = (\eta / \eta_0) - 1$$

(3) 对数粘度数 $\{\eta\}$

$$\{\eta\} = (\ln \eta_r) / C = \left(\ln \frac{\eta}{\eta_0} \right) / C$$

(4) 换算粘度或称粘度数 $\eta_{r,p} / C = (\eta_r - 1) / C$

在 C 很小, $\eta_r - 1$ 也就很小时有

$$\frac{\eta_{r,p}}{C} = \lim_{C \rightarrow 0} \frac{\ln(1 + \eta_r - 1)}{C} = \lim_{C \rightarrow 0} \frac{\ln \eta_r}{C} = \lim_{C \rightarrow 0} \{ \eta \}$$

(5) 固有粘度或称极限粘度数 $[\eta]$

$$[\eta] = \lim_{C \rightarrow 0} \frac{\frac{\eta}{\eta_c} - 1}{C} = \lim_{C \rightarrow 0} \frac{\ln \eta_r}{C} = \lim_{C \rightarrow 0} \frac{\eta_{r,p}}{C}$$

在以上的各式中 C 是体积重量浓度 $[\text{g}/\text{cm}^3]$ 。

3. 胶体的粘度

对胶体, 通常只应用动力粘度 η 和运动粘度 ν 。式中的密度为胶体的平均密度 $\bar{\rho}$ 。

1.4 影响液体粘度的因素

有下列因素常在实用中影响液体的粘度。

1. 温度

液体的粘度对温度十分敏感, 当温度升高时, 液体的体积膨胀, 液体中缺空的数目增多, 分子间的距离加大, 固着力减小, 粘度下降。特别是对碳氢结构的液体, 在低温范围内其表现尤为明显。

液体的粘度随温度变化的程度可用下列方法表示之:

(1) 粘温图

对具体的液体作出常压下其温度与粘度的关系线, 此线即称为此种液体的粘温图。对大多数液体, 此线近似为直线。由于实验和资料储存工作量的限制, 此法实际上只限于用于常见液体。

(2) 粘温线的斜率

可以用不同温度下粘温图上不同点的斜率来表示粘度对

温度的敏感程度。由于此斜率无物理意义，且使用范围与粘温图一样狭窄，应用更为不便，故实际上并未被工程技术界采用。

(3) 粘温系数

粘温系数 VTC 定义为

$$VTC = \frac{v_{37.8} - v_{98.9}}{v_{37.8}} = 1 - \frac{v_{98.9}}{v_{37.8}}$$

此处 $v_{37.8}$ 和 $v_{98.9}$ 为该种液体在温度为 37.8°C 和 98.9°C 时的运动粘度。VTC 的优点是可以数字来表示粘温性质，但只限于 37.8°C 到 98.9°C 的温度范围内。实际上 VTC 也未曾被工程技术界采用。

(4) 粘度指数

粘度指数 V. I 可用数字来表示液体的粘温特性。这种表示法广泛用于工业用油行业中。它表示某液体的粘度随温度变化的程度与标准液体的粘度随温度变化的程度之间的相对比较值。粘度指数越大的液体，其粘度随温度的变化就越小。过去为了使工业用油的粘度指数在零到一百之间变化，故将当时粘温性能最差的环烷基油定其 V. I = 0，而将当时粘温性能最好的石蜡基油定其 V. I = 100，以这两种油作为确定粘度指数的界限。近年来，由于炼油技术的发展，油的品种大增，粘度指数高于一百和低于零的油相继出现，因而原来设定的界限已不再有意义。实际工作时可根据试油在 50°C 和 100°C 时的运动粘度，从预先制好的图表上直接查出其粘度指数。或者用下式计算

当 V. I ≤ 100 时用

$$V. I = \frac{L - U}{L - H} \times 100$$