

第十一章 冶金熔体粘度测定

§ 1. 概述

在高温冶金过程中，往往要有熔体参加反应。这些反应的进行情况由许多条件决定，其中熔体的粘度是重要的影响因素之一。例如渣——钢反应中，渣、钢的化学成分和温度等固然是必要的前提，但熔体的粘度（流动性）将给这一反应创造必要的动力学条件，否则反应也是很难进行的。再如在原子能工业中，应用液态金属做载热剂，也需要知道液态金属在高温下的粘度数据。

长期以来，人们对炉渣、熔融玻璃、熔盐以及液态金属的粘度作过许多测定与研究，但由于在高温下实验的困难，对高温熔体粘度的研究，除少数重要体系外，是很不够的。研究高温熔体的粘度，不仅能为冶金生产提供必要的参数，而且也有助于揭示高温熔体微观结构的内在规律，因为熔体粘度的变化是其结构变化的宏观表现。

液体流动时所表现出的粘滞性，是流体各部分质点间所产生内磨擦力的结果。在液体内部，可以想象有无数多互相平行的液层存在，如图1所示。在相邻二液层间若有相对运动时，则沿液层平面产生运动的阻力作用。

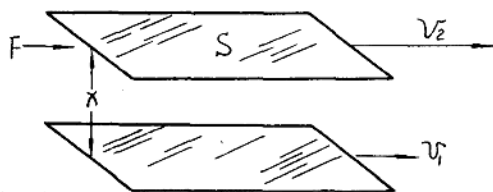


图1 液层间内磨擦力的产生

速度大的部分 (v_2) 超前于速度小的部分 (v_1)，因而流体内部相对运动速度是依次减小的。这种作用就是液体的内磨擦力，这种性质就是液体的粘性。假如流体的速度比较小，则各液层的运动方向可认为是互相平行的，速度的变化也是连续的，这种流动状态称为“层流”。在液体粘度测度诸方法中，均以层流流动状态为基础的。

在流体内部，如果垂直于流动方向为 x 轴，液层面积为 s ，二液层间的速度梯度为 dv/dx ，则二液层间的磨擦力 F 可用下式表示：

$$F = \eta \frac{dv}{dx} s \quad (1)$$

此式可改写为：

$$\eta = \frac{F}{s} \cdot \frac{dx}{dv} \quad (2)$$

上二式称为牛顿粘度公式，式中 η 是粘度系数，或称粘度，是决定于液体性质的重要物理参数。粘度系数的意义，表示在单位速度梯度下，作用在二液层间单位面积上切力的大小。粘度的CGS制单位为达因·秒/厘米²（或克/厘米·秒），通常以“泊”（Poise）表示。为了使用方便，有时也用其百分之一表示，称为“厘泊”（CP）。各类液体的粘度范围如下：

水 (20°C)	1.0050CP
有机化合物	0.3~30CP
熔盐	0.01~10 ⁴ P
液态金属	0.5~5 CP
炉渣	0.05~10 ⁵ P
纯铁 (1600°C)	4.5 CP

在流体力学中，还经常用到“动力学粘度”（或称“动粘度”）的概念，其定义为 $\nu = \eta / \rho$ ，式中 ρ 为液体的密度。动力学粘度 ν 的CGS制单位是厘米²/秒，以“斯”（Stokes）表示。

在粘度测定方法中，应尽可能保持流体处于层流状态，但实际上，液体在局限的测定条件下产生“紊流”是不可避免的，特别是应用旋转粘度计当转速大时，这种现象尤为明显。动力学粘度值可以给出流体流动时产生紊流难易程度的大致标准，即 ν 值越大，则表示流体流动时产生紊流越困难。例如水的粘度（20℃, 1.009CP）和水银的粘度（20℃ 1.554CP）差不多，但它们的动力学粘度相差很大（ $\nu_{\text{水}}=0.01$ 斯； $\nu_{\text{水银}}=0.0012$ 斯），这表明在同样条件下，水银比水更容易产生紊流流动。由此可见，动力学粘度数据可以为合理选择实验条件提供参考。

高温熔体粘度的测定方法有：毛细管法、旋转柱体法、扭摆振动法和落球法等。表1是粘度测定诸方法的测定范围。

粘度测定方法及其测定范围

表1

测定方法		测定范围
旋转法	1) 旋转柱体法 a) 共轴二重柱体旋转法 b) 单一柱体旋转法	$10^8 \sim 10^{-2}$ 泊 $10^5 \sim 10^{-2}$ 泊
	2) 旋转园板法	$10^{12} \sim 10^{-1}$ 泊
	3) 旋转园锥—平板法	$10^3 \sim 10^{-1}$ 泊
振动法	1) 旋转振动法	1 泊以下
	2) 振动片法	$10^4 \sim 1$ 泊
毛细管法		10^6 泊以下
落体法	1) 落球法	$10^5 \sim 1$ 泊
	2) 转落球法	$3 \times 10^3 \sim 10^{-1}$ 泊
	3) 落下园柱法	$10^{11} \sim 10^{-1}$ 泊
	4) 气泡法	$1.5 \times 10^4 \sim 0.5$ 泊

上述这些测定方法中，测定液态金属和熔盐粘度主要使用扭摆振动法，而测定炉渣粘度一般使用旋转柱体法、扭摆振动法和落球法。

高温粘度计的结构形式是各种各样的，特别是随着电测技术的发展，仪器的结构和性能都在不断完善和提高。这里将要介绍的粘度测定诸方法，只侧重于方法的原理及有关问题。

§ 2. 粘度与温度的关系

绝大多数液体，粘度和温度有极密切的关系。把这种关系用数学式表达出来是人们长期以来的愿望。在理论分析与科学实验基础上，不同工作者先后提出了一系列这种关系的实验式与理论式，如表 2 所示。

粘度与温度的关系式 表 2

公 式	著 者	备 考
$\eta = A \exp B/T$	Reynolds	A、B: 常数
$\eta = (Nh/v) \exp \frac{-\Delta S}{R} \exp \frac{\Delta H}{RT}$	Eyring	N: 亚弗加德罗常数, h: 普朗克常数, V: 分子容积, ΔS : 活化熵, ΔH : 活化焓
$\eta = \frac{1}{2} n_0 \tau_0 K T \exp \frac{E}{KT}$	Frenkel	τ_0 : 分子平均振动周期, n_0 : 单位体积的粒子数, K: 波不茨曼常数) E : 势垒高度
$\eta = c/(v-w)$	Batschinsky	V: 分子容积, W: Van der Waals 体积修正常数, c: 常数
$\eta = A(MT)^{1/2} / V^{2/3}$	Andrade	A: 常数, M: 分子量 d : 平均热膨胀系数
$\eta = A \exp \left\{ 1/[d'(T-T_0)] \right\}$	Fulcher	$d' = dv/v_0$ v_0 : 最密充填体积 T_0 : v_0 的温度
$\eta = A \exp(rv_0/v) \exp(E_v/RT)$	Macedo-Litovitz Diens	V_f : 相当一个分子的平均自由体积, r : $\frac{1}{2} \sim 1$, E_v : 势垒高度

作为实验式，一般均表示成下列形式：

$$\eta = A \exp E_{\eta} / RT \quad (3)$$

此式表明液体粘度与温度之间存在着指数函数关系。式中 A 为常数， E_{η} 称为粘流活化能， R 为气体常数， T 为绝对温度。

粘流活化能 E_{η} 由两部分能量组成，一部分为造成质点移动形成孔穴所必须的能量，另一部分为使质点通过孔穴移动的附加能量。

为了对具有不同克分子体积的液体进行比较，在实验式中引入克分子体积 v ，于是形成下式：

$$\eta v^{1/3} = A \exp E_{\eta} / RTv \quad (4)$$

由于高温熔体结构变化的复杂性，上述各式都有自己的适用范围，使用时尤应通过实验验证，否则会引起很大的偏差。

粘流活化能的数值，除具有理论意义外，也可用它来大致判断流体粘度的大小，即粘流活化能越大，则流体粘度越大，反之亦然。表 9 是几种液体的粘流活化能的数值。

几种液体的粘流活化能

表 3

液体种类	E_{η} 变化范围 (仟卡/克分子)
非极性液体	0.5 ~ 1
极性液体	1 ~ 3
氢键和羟基键	2 ~ 10
金属	0.5 ~ 2
简单离子液体	3 ~ 10
玻璃	20 ~ 150

粘流活化能数值是通过实验获得的。在准确测定液体的粘度 (η) 与温度 (T) 曲线基础上，依式 $\eta = A \exp E_{\eta} / RT$ ，取 $\ln \eta$ 对 $\frac{1}{T}$ 作图，应得一直线，其斜率即为粘流活化能 E_{η} 值。

§ 3. 粘度的测定方法

3. 毛细管法

毛细管法是在常温下测定液体粘度使用最广的方法。在高温下测定熔体粘度，选择具有相当的耐热和耐腐蚀的毛细管材料，并保证毛细管内径加工均匀是很困难的。其次，观察熔体在毛细管内的流动状态，也不像在常温下那样方便。尽管如此，作为一种绝对粘度计，对某些熔体粘度测定，仍有采用，有的已使用到 1250 °C 的高温。

1) 方法原理 毛细管法的原理是基于所谓泊稷叶 (Poiseuille) 定律。用外力使液体流过毛细管时，液体在毛细管径向形成速度梯度而产生内磨擦力。当外力与内磨擦力相等时，液体在毛细管内匀速流动，这是泊稷叶定律的前提之一。

取一根半径为 r 长度为 l 的毛细管 (图 2)，若毛细管两端压差为 P ，在离开管轴 r_x 地方层流流速为 u ，径向速度梯度为 $\frac{du}{dr_x}$ ，则作用在液层之间的内磨擦力为：

$$F_{\text{内}} = -2\pi r_x l \eta \frac{du}{dr_x} \quad (5)$$

同时作用在这一部分液体上的外力为：

$$F_{\text{外}} = \pi r_x^2 P \quad (6)$$

当匀速流动时，则二力相等：

$$F_{\text{内}} = F_{\text{外}} \quad \text{或}$$

$$\pi r_x^2 P = -2\pi r_x l \eta \frac{du}{dr_x} \quad \text{或}$$

$$r_x dr_x = - \frac{2\eta l}{P} du \quad (7)$$

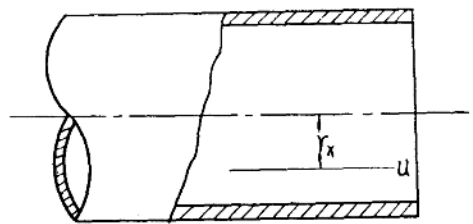


图2 毛细管示意图

实验证明在管壁上液体是静止的，积分上式：

$$\int_r^{r_x} r_x dr_x = - \frac{2\eta\ell}{P} \int_0^u u du$$

于是得径向速度分布为

$$u = \frac{P}{4\ell\eta} (r^2 - r_x^2) \quad (8)$$

因此，在单位时间内，通过半径为 r_x 到 $(r_x + dr_x)$ 一环形液体体积流量 dV ，则 $dV = 2\pi r_x \cdot dr_x \cdot u$ ，积分后得在时间 t 内通过整个液体流量为：

$$V_t = \frac{\pi r^4}{8\ell} \cdot \frac{Pt}{\eta} \quad (9)$$

该式即为泊稷叶定律的基本表达式。

应用此定律须注意其假设条件，即液体是非压缩性的，液体作层流流动，流动不随时间变化，以及流体与管壁无滑动。

泊稷叶公式推导中，假设外力全部用以克服液体的内摩擦力，而实际上并非完全如此，因为液体在毛细管内流动的，总要有一定的速度，故这部分液体动能的增加也要消耗外力，所以在(9)式中引进动能修正项，公式变为：

$$\eta = \frac{\pi r^4 Pt}{8\ell V_t} - \frac{m\rho V_t}{8\pi\ell t} \quad (10)$$

式中 ρ 为液体密度， m 为常数，由大量实验测得 m 值可取 1.1~1.2。

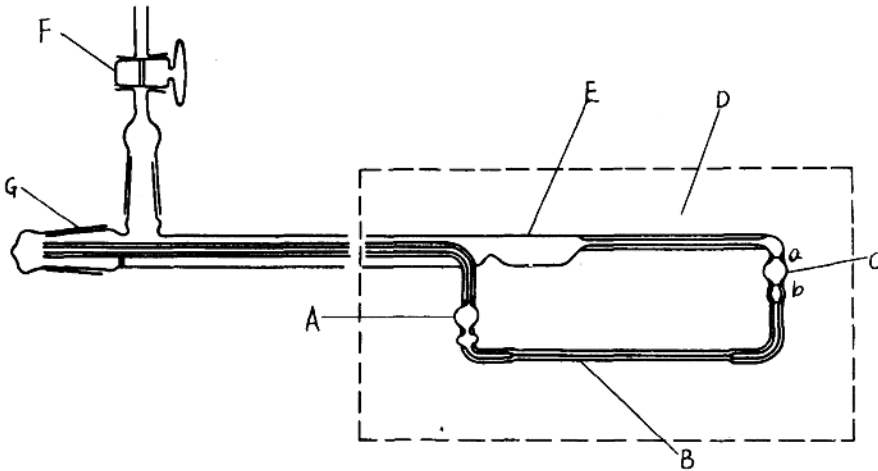
液体在毛细管两端流动时，不可能完全满足层流条件，要有径向流动，于是公式引入管端修正项 (nr) ，公式变为：

$$\eta = \frac{\pi r^4 Pt}{8(\ell + nr) V_t} - \frac{m\rho V_t}{8\pi(\ell + nr) t} \quad (11)$$

修正项 (nr) 也称为“附加管长”，其中 n 可由实验测得， n 可取 0.5~0.8。

2) 典型装置与测量方法

(1) 水平毛细管粘度计 图3是水平毛细管粘度计较典型的装置。装置用石英制成。毛细管B内径为0.4毫米，长175毫米，C为已知容积。如



A—储存容积 B—毛细管 C—已知容积 D—高温炉
E—样品容积 F—真空活塞 G—加样磨口

图3 水平毛细管粘度计

测金属粘度。首先由G将金属试样加到样品容积E内，打开真空活塞F，将体系抽至真空。然后将装置伸入高温炉恒温带中加热，待试样熔化并达到所需温度后，倾斜炉体，使熔体流经C和B而进入A。之后，向相反方向倾斜炉体，使熔体重新流回已知容积C，通过炉子另一端石英窗观察。使液面略高于已知容积上部刻线a后，立即将炉子恢复水平位置，此时熔体靠自身重力而流入毛细管，用秒表准确记录熔体液面流经已知容积C上下刻线a b所需的时间t。于是可代入式(11)求出熔体的粘度值。

$$\eta = \frac{\pi r^4 g h}{8 \nu (\ell + nr)} \rho t = \frac{m \nu}{8 \nu (\ell + nr)} \frac{\rho}{t}$$

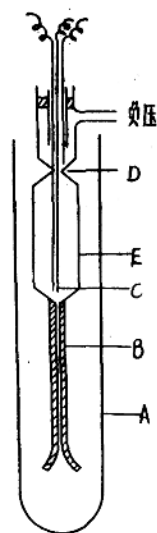
式中 r —毛细管半径;
 V —已知容积;
 t —熔体流过已知容积的时间;
 ρ —熔体密度;
 l —毛细管长度;
 m 、 n —修正系数;
 g —重力加速度;
 h —液柱高。

当然,毛细管粘度计也可作为相对粘度计使用,即令 $A = \frac{\pi r^4 g h}{8 \nu (\ell + nr)}$,
 $B = \frac{m \nu}{8 \pi (\ell + nr)}$, 于是公式可变成下列式:

$$\eta = A \rho t - B \frac{\rho}{t} \quad (12)$$

式中 A 、 B 称为仪器常数,可用两种已知粘度的液体进行标定。

(2)垂直毛细管粘度计 图4是垂直毛细管粘度计的典型装置图。装置用耐热玻璃制成。毛细管直径为0.5毫米,长12厘米。试料在玻璃容器底部熔化,用负压将熔体抽进毛细管B和熔体贮存器E中。熔体吸入高度用铂接点探针O和D指示。当去掉负压后,熔体靠自身重力下降,若事先准确测定贮存器E的容积,以及测量出熔体流过该容积的时间,便可用式(11)计算熔体在实验温度下的粘度值。



A—玻璃容器 B—毛细管
 C—下部接点 D—上部接点
 E—熔体储存器
 图4 垂直毛细管粘度计

在实际测定中,垂直毛细管法多用

于熔融金属，而水平毛细管法多用于熔盐。

毛细管粘度计设备简单，方法可靠，但在高温下使用时，遇到最多的问题是毛细管材质的选择和大容积均匀温场的获得，还有观测技术等。随着实验技术的发展，毛细管粘度计也将能扩大在高温下的适用范围。

2. 旋转柱体法

旋转柱体法是测量高粘度熔体粘度的主要方法，广泛用于测定熔渣及熔融玻璃的粘度。这种方法的测定粘度范围为 $10^{-1} \sim 10^6$ 泊。

1) 方法原理 旋转柱体法的装置由两个半径不等的同轴柱体组成。

如图5所示。外柱体为空心筒状，实际上就是盛熔体的坩埚。在内外柱体之间，充以待测粘度的液体。当外力使二柱体之一匀速转动而另一柱体静止不动时，则在二柱体之间径向距离上便产生了速度梯度，于是在液体中便产生了内磨擦力。由于内磨擦力的作用，将使静止的柱体克服其惯性随着转动柱体一起转动。

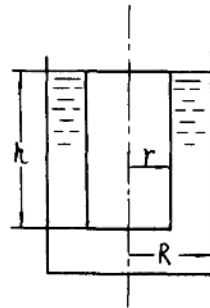


图5 旋转柱体法示意图

若使静止柱体仍然静止不动，必须由外界施加一个大小与粘滞力矩相等而方向相反的平衡力矩，而这一平衡力矩的大小，便对应于二柱体之间液体的一定粘度值。

若同轴内外柱体的半径分别为 r 和 R ，内柱体浸设深度为 h ，转动柱体的角速度为 Ω 。同时假设液体作层流流动，二柱体无限长，液体与柱体接触无滑动。此时，二柱体之一转动而另一柱体不动时，则通过液体内磨擦力而作用在静止柱体面上的旋转力矩可推导为：

$$M = \frac{4\pi\eta h\Omega}{\left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2}\right)} \quad (13)$$

$$\text{或 } \eta = \frac{M}{4\pi h\Omega} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2} \right) \quad (13')$$

由式(13')可见,在用旋转柱体法测定液体粘度时,若能测定力矩 M ,浸没深度 h ,角速度 Ω ,内柱体半径 r 和外柱体(坩埚)半径 R ,便可计算出液体的粘度值。

在实际测定装置中,内外柱体不可能是无限长的,在端面间的粘滞阻力也会影响力矩的大小,这种影响称为“端面效应”。为了修正端面效应的影响,通常在式(13')中引入“附加长度” C ,于是得下式:

$$\eta = \frac{M}{4\pi(h+C)\Omega} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2} \right) \quad (14)$$

修正项 C 是以长度表示的数值,一般通过实验测定。图6给出内柱体浸没液体的两种情况, a 为部分浸没, b 为全部浸没。当内柱体全部浸没

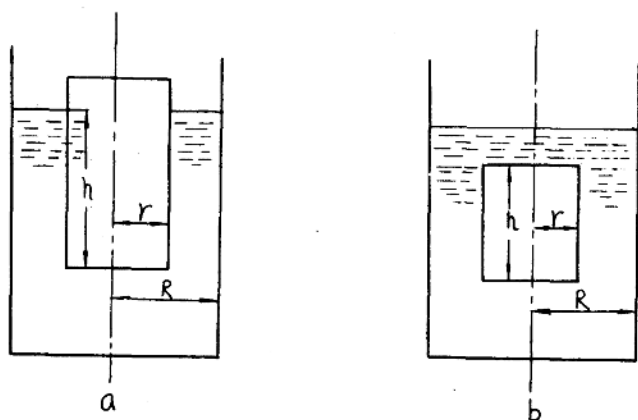


图6 园筒浸入液体的两种情况

液体时,测量端面效应须采用多个直径相同而长度不等的内柱体,但保持二端面的距离相等。当内柱体部分浸没液体时,可调整液体高度 h 来改变浸没深度,但内柱体下端面的液层厚度保持不变。不论上述那种情况,便

用同一种已知粘度的工作液体，在旋转粘度计上作实验，改变浸没深度 h 测定 M/Ω 值。再用 h 与 M/Ω 作图，曲线外推到 h 轴上，则交点的 h 值即为所求附加长度 C 值。

另一种修正端面效应的方法是直接应用式 (13')，即对同一种工作液体，改变不同的浸没深度 h ，测量对应的粘度值 η ，然后取 η 对 $\frac{1}{h}$ 作图，将曲线外推到 $\frac{1}{h}$ 为零的粘度值，即为真实的粘度值，因为 $\frac{1}{h}$ 为零，意即 $h \rightarrow \infty$ ，符合公式推导中柱体为无限长的假设。

端面效应修正项 C ，对粘度在 1~150 泊的液体，可看作常数，而对粘度小于 1 泊的液体， C 值对粘度测定影响显著。为了应用上的方便，式 (14) 可简化为：

$$\eta = K \cdot \frac{M}{\Omega} \quad (15)$$

式中 K 值为仪 10 常数，它是由内柱体半径 r 、坩埚半径 R 和浸没深度 h 决定的， K 值通常用已知粘度液体进行校正。由式 (15) 可见，用旋转柱体法测定液体粘度，就变成了力矩 M 和旋转角速度 Ω 的测量。显然，这种测量可通过两个途径简化：一是给柱体以恒定不变的转矩 M ，测定由于液体的粘度而引起的旋转角速度 Ω 的变化；另一种是使柱体以恒定的角速度旋转，测量由于液体粘度而引起磨擦力矩的变化。实践中，后一种途径被广泛采用。

在旋转柱体法中，柱体的旋转力矩尽管有确定的物理意义，但在多数情况下其绝对值是很难简单测定的，故一般采用观测与转矩 M 成比例的其他物理量的变化，以达粘度测量的目的。这些物理量一般有重量，弹性吊丝的扭转角和电磁量等等。这种被测物理量间的有效转换，不仅提高了粘度测量精度，而且为粘度计操作自动化也提供了可能性。

2) 内柱体旋转法 此法系内柱体转动而坩埚不动，图 7 是装置示意图。内外柱体直径为 d_1 和 d_2 ，内柱体浸没深度 h ，使内柱体旋转的荷重

W, 旋转机构的磨擦力为 f 。连接滑轮半径为 r' , 内柱体转速为 N , 重力加速度为 g 。于是可导出以下粘度公式:

$$\eta = (W-f)g \sqrt{2Nh\pi^2} \left(\frac{1}{d_1^2} - \frac{1}{d_2^2} \right) \quad (16)$$

式中右侧除 $(W-f)$ 与 N 外, 对某一实验装置可视为常数, 故公式可简化为:

$$\eta = K \cdot (W-f) \sqrt{N} \quad (17)$$

式中 K 与 f 均可用已知粘度液体标定。

这种粘度计转动惯量大, 适合于测定高粘度液体粘度, 在 $50 \sim 10^8$ 泊范围内, 测定精度可达 $\pm 5.2\%$ 。

内柱体旋转法的另一种测量转矩的方式是测量弹性吊丝的扭转角。内柱体用弹性吊丝悬挂并旋转, 它可以克服上述方法中的机械磨擦等问题, 但吊丝的平衡扭转角度的测量比较困难。关于利用吊丝测量转矩的方法, 将在下面外柱体旋转法中讨论。

3) 外柱体旋转法 所谓外柱体, 就是指盛熔体的坩埚, 故也叫坩埚旋转法。图 8 是这种方法装置示意图。在内外柱体间充满待测液体, 内柱体用弹性吊丝悬吊, 吊丝上端固定不动。当外柱体加一转矩使其以一定角速度旋转时, 则由于液体的内磨擦力而施予内柱体以扭转力矩, 使吊丝发生扭转。若内柱体所受的扭转力矩与吊丝的平衡转矩相等时, 吊丝的扭转角度不变, 并与液体的粘度值相对应。

弹性吊丝的扭矩可用下式表示:

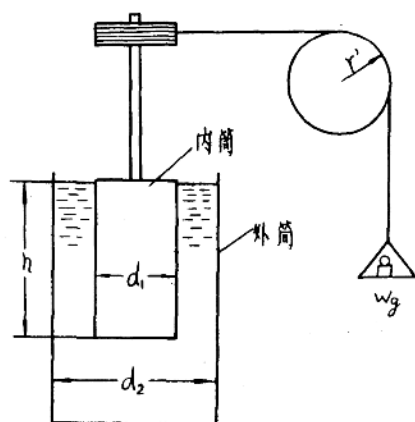


图 7 内筒旋转法装置示意图

$$M_t = \varphi \frac{GJ_p}{\ell} \quad (18)$$

式中 φ ——扭转角度，
 G ——吊丝的弹性系数，
 J_p ——吊丝的极惯性矩，
 $J_p = \frac{\pi d^4}{32}$
 ℓ ——吊丝长度，
 d ——吊丝直径。

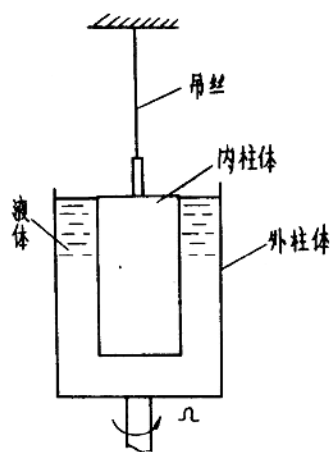


图8 外柱体旋转装置示意图

当内柱体转矩与吊丝扭矩相等时，据式(13')与(18)整理后得：

$$\eta = \frac{R^2 - r^2}{4\pi h R^2 r^2} \cdot \frac{GJ_p}{\ell} \cdot \frac{\varphi}{\Omega} \quad (19)$$

对于某一确度的粘度计， R 、 r 、 h 、 G 、 J_p 、 ℓ 均可视为常数，于是可得下面简化式：

$$\eta = K \frac{\varphi}{\Omega} \quad (20)$$

式中 K 称为仪器常数，其物理意义为：

$$K = \frac{R^2 - r^2}{4\pi h R^2 r^2} \cdot \frac{GJ_p}{\ell} \quad (21)$$

在粘度测量中，式(21)中各量是很难全部准确知道的，所以仪器常数 K 通常用已知粘度液体进行标定。这种方法很简便，但要求标定用的液体的粘度数据准确知道，并且使标定 K 值的实验条件与高温粘度测量条件力求尽量一致，否则要引起较大的测量误差。

外柱体旋转法的特点是仪器常数比较稳定。由于吊丝上端固定不动，

吊丝扭转角容易测定，如采用光照灯尺系统可达很高的测量精度。

外柱体旋转法最大的技术困难，在于内外二柱体的同轴性不易保证。一旦二轴成不重合，则内柱体在离心作用下，逐渐远离轴线，以致最终接触坩埚内壁，使测量产生巨大误差。为了解决这个问题，要求内外柱体加工严格，所用耐火材料热膨胀应十分均匀，以保证坩埚在高温下旋转和在常温下一样稳定。其次，内外柱体的同轴调节要十分精细而耐心。马达减速、传动系统也应尽量减少振动。

在要求炉内密封或保持一定气氛情况下，还必须解决炉体与旋转系统的滑动密封问题。经常采用的方法是“液封”，如图9所示。用一环形液封槽，同轴地固定在转轴上，使炉管或密封炉壳下端环形圈伸入液封槽内，当其中充以封闭液时，即可达到即密封又不影响转动的目的。封闭液的选择，视该区工作温度而定，一般采用高沸点油类或低熔点金属与合金，后者往往需要配以火焰或电加热装置，以使金属或合金熔化。

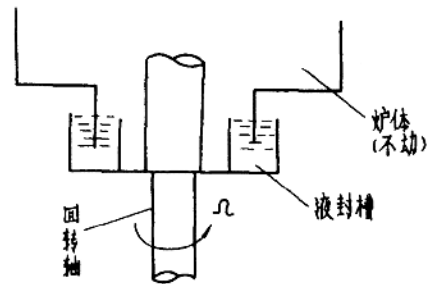


图9 液封炉底示意图

5. 扭摆振动法

对于低粘度液体（如液态金属和熔盐）粘度测定，广泛采用扭摆振动粘度计。扭摆振动法原理是基于阻尼振动的对数衰减率与阻尼介质粘度的对应关系。图10是阻尼振动示意图。用一根弹性吊丝，上端固定不动，下端挂一重物，成一悬吊系统。当绕轴线外加一偶力矩使吊丝转动某一角度，去掉力矩后，则吊丝在弹性力作用下绕轴线往复振动。若介质磨擦与吊丝自身内磨擦不计，则系统作等幅简谐振动，即每次振动的最大扭角不

变。若将重物伸入液体中，上述振动状态受到液体内磨擦力的阻尼作用，迫使振动逐渐衰减，直至振幅为零而振动停止。这种阻尼振动服从以下规律：

$$A = k e^{-\lambda \frac{t}{T}} \cos 2\pi \frac{t}{T}$$

..... (22)

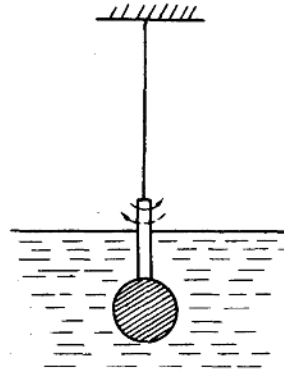


图 10 阻尼振动示意图

- 式中 A——振幅，
 t——时间，
 T——振动周期，
 λ——对数衰减率，
 k——常数。

对某一确定的振动系统，T 与 λ 是一定值。可见，阻尼振动的振幅是随时间而衰减的，且呈指数关系。

对数衰减率的定义是：

$$\lambda = \frac{\lg A_n - \lg A_{n+m}}{m} \quad (23)$$

$$\text{或 } \lambda = 2.303 \frac{\lg A_n - \lg A_{n+m}}{m} \quad (23')$$

式中 A_n 与 A_{n+m} 是第 n 次与第 $n+m$ 次的振幅。此式表明：对数衰减率等于两次振幅的对数差与振动次数之比值。此值对确定的阻尼振动系统是不变的。

对于扭摆振动粘度计，造成振动衰减的主要原因是液体介质的粘滞性，故一般认为对数衰减率是液体的粘度和密度的函数。通过振幅测量

计算对数衰减率是扭摆振动法测定液体粘度的基础。但在扭摆振动法中，液体粘度与其对数衰减率的关系是很复杂的，不便于应用，实际上采用的是一系列经验的或半经验的公式。由于实验条件的不同，不同作者先后提出了许多粘度计算公式。下面介绍几种粘度计不同类型及常用的计算公式。

1) 柱体扭摆振动法 图 11 是该法装置示意图。用一弹性吊丝，上

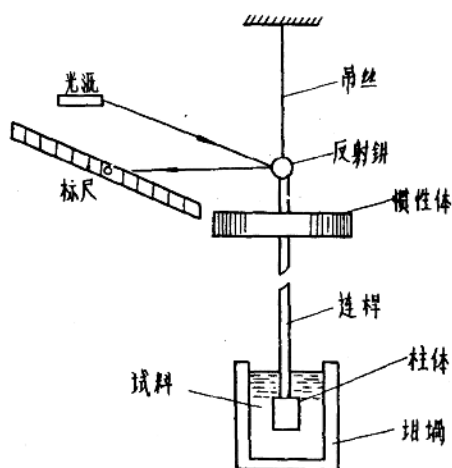


图 11 柱体回转振动法示意图

端固定，下端悬挂惯性体、连棒和柱体，连棒上固定一反射镜。柱体插入盛于园筒形坩埚的液体试样中，坩埚置于高温炉内，加热到实验温度。用外力给悬吊系统以偶力矩，则吊丝发生扭转，达一定角度后去掉外力矩，悬吊系统便在吊丝扭力、系统的转动惯量和液体对柱体的粘滞阻力作用下，作阻尼衰减振动。其对数衰减率与液体粘度的关系可用下式表示：

$$\eta = \frac{(Dl)^{1/2}}{K} \lambda \quad (24)$$

式中 η —— 液体粘度；