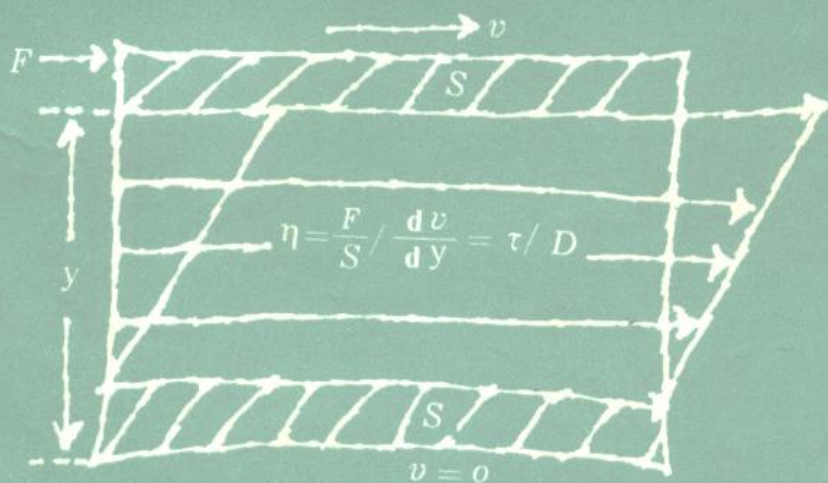


粘度测量

VISCOSITY MEASUREMENT

陈惠钊 编著



中国计量出版社

粘 度 测 量

陈惠钊 编著

中国计量出版社

新登(京)字024号

内 容 简 介

本书较全面地介绍了粘度及其测量原理、测量技术、实验装置以及粘度基、标准和量值传递等。书末附录常用流变学术语。

本书可供从事粘度研究与测试的科技人员、实验室分析人员、计量检定人员参考。

粘 度 测 量

陈惠钊 编著

责任编辑 陈艳春

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

◆◆

开本 787×1092/32 印张 12.75 字数 278千字

1994年6月第1版 1994年6月第1次印刷

印数 1—3000

ISBN 7-5026-0663-7/TB·436

定价 11.00 元

版权所有 翻版必究

前 言

粘度是流体的重要物理特性。粘度测量与石油、化工、轻工、交通、冶金、建材、煤炭及国防等领域的关系非常密切。在这些领域中，粘度测量是控制生产流程、实现安全生产、提高产品产量、保证产品质量、节约与开发能源的重要手段。在医学领域，测量血液及其他生理液体的粘度是最新发展起来的诊断学，特别是心血管疾病及癌、瘤等疑难病症的重要诊断手段。在物理化学、流体力学、冶金学等科学领域中，粘度测量对流体性质及流动状态的研究起着重要的作用。

近年来我国粘度测量与计量大有发展，作者编著本书，希望能帮助读者理解与掌握粘度基本知识及各种测量方法原理与测量技术。

本书内容力求简明、结合实际。书中对粘度测量的基本知识作了概括性论述，对应用广泛的毛细管法和旋转法作了略为详细的介绍，而对落球法、振动法、流动杯法、平板法等作了简要介绍。对于具有复杂流动特性的非牛顿流体的性质及测量方法，也以专门的篇幅加以叙述。高温下熔体的粘度测量也因其具有与常温测量不同的某些特殊性而单独列为一章。最后一章叙述了我国粘度基、标准的建立方法及国内的粘度量值传递以及各种粘度计的检定方法。此外，在本书的附录中还编入常用的流变学术语。

作者希望本书对从事本专业的广大读者能有所裨益。

由于作者水平有限，书中难免有错误之处，敬请读者指正。

作者

1993年元月

目 录

第一章 流体的粘度	(1)
一、(动力)粘度	(1)
1. (动力)粘度的概念	(1)
2. 牛顿粘性定律	(3)
3. (动力)粘度的定义及单位	(4)
二、运动粘度	(5)
三、条件“粘度”	(7)
1. 条件“粘度”的定义与单位	(7)
2. 条件“粘度”与运动粘度的关系	(9)
四、溶液的粘度	(19)
五、非牛顿粘度	(20)
六、粘度与温度的关系	(20)
1. 气体的粘温关系	(21)
2. 液体的粘温关系	(27)
七、粘度与压力的关系	(34)
1. 气体粘度与压力的关系	(34)
2. 液体粘度与压力的关系	(39)
第二章 毛细管法	(43)
一、基本原理	(43)
1. 泊肃叶定律	(43)
2. 动能修正	(45)
3. 末端修正	(46)
4. 层流条件	(48)
5. 泊氏公式其他假设条件的讨论	(49)
6. 测量原理	(50)

二、重力型毛细管法	(51)
1. 重力型毛细管粘度计	(51)
2. 实验装置	(59)
3. 影响因素	(63)
三、加压型毛细管法	(74)
1. 绝对测量法	(75)
2. 相对测量法	(76)
四、溶液粘度测量法	(76)
1. 粘度计及操作方法	(76)
2. 测量与计算	(78)
五、工业流程的在线测量	(78)
第三章 旋转法	(83)
一、基本原理	(83)
1. 同轴圆筒式	(83)
2. 锥-板式	(90)
3. 圆板式	(94)
4. 双锥式	(97)
5. 双半球式	(99)
6. 双半椭球式	(99)
7. 圆球式	(102)
二、影响因素	(102)
1. 末端效应	(102)
2. 湍流	(111)
3. 二次流	(113)
4. 偏心	(114)
5. 壁滑移	(116)
6. 剪切热 (粘性热)	(117)
7. 仪器的热膨胀	(120)
8. 转速变化	(121)
9. 仪器的自身摩擦	(121)

三、旋转粘度计的基本结构	(123)
1. 传感系统	(123)
2. 力矩系统与测矩系统	(123)
3. 驱动系统与测速系统	(127)
4. 定位系统	(128)
5. 恒温系统	(129)
四、实验室旋转粘度计	(129)
1. 同轴圆筒旋转粘度计	(129)
2. 其他形式旋转粘度计	(139)
3. 实验室旋转粘度计的一般测量方法	(145)
五、工业流程旋转粘度计	(146)
1. 工业流程旋转粘度计的特点	(146)
2. 分类与应用	(146)
3. 某些工业流程旋转粘度计(列表)	(153)
第四章 其他方法	(155)
一、落体法	(155)
1. 升落球法	(155)
2. 液落球法	(162)
3. 陷入式落柱法	(167)
4. 套筒式落柱法	(171)
5. 升泡法	(173)
6. 工业流程落体法	(177)
二、振动法	(180)
1. 扭转振动式	(180)
2. 振动片式	(184)
三、平板法	(188)
1. 滑板式	(188)
2. 带式	(189)
3. 倾斜板式	(190)
4. 压板式(横流式)	(190)

四、流出杯法	(192)
1. 概述	(192)
2. 恩格勒粘度计 (简称恩氏粘度计)	(192)
3. 雷德伍德粘度计 (简称雷氏粘度计)	(194)
4. 赛波特粘度计 (简称赛氏粘度计)	(196)
5. 福德杯 (涂料杯)	(197)
6. 赞恩杯	(199)
7. 马氏漏斗	(200)
8. 稠度杯	(201)
9. 其他流出杯	(202)
10. 工业流程自动流出杯	(202)
第五章 非牛顿流体及非牛顿粘度测量法	(204)
一、非牛顿流体	(204)
1. 有关概念	(204)
2. 牛顿流体与非牛顿流体	(208)
3. 时间独立性流体	(210)
4. 时间相关性流体	(216)
5. 粘弹性体	(221)
二、毛细管法	(227)
1. 测量原理	(227)
2. 测量仪器与测量方法	(236)
三、同轴圆筒旋转法	(237)
1. 测量原理	(237)
四、其他方法	(246)
1. 锥-板法	(246)
2. 旋转圆板法	(246)
3. 振动法	(249)
4. 平板法	(250)
第六章 高温粘度测量法	(257)
一、玻璃熔体的粘度及其测量方法	(257)

1. 概述.....	(257)
2. 玻璃的粘温关系	(258)
3. 旋转法.....	(264)
4. 升球法.....	(270)
5. 陷入法.....	(276)
6. 梁弯法.....	(278)
7. 纤维伸长法(拉丝法)	(280)
8. 扭曲变形法	(282)
9. 平板法.....	(282)
10. 玻璃特性温度点测量法	(284)
二、其它高温熔体的粘度测量	(289)
1. 概述.....	(289)
2. 熔融金属、熔渣、焊渣及煤渣粘度测量法.....	(290)
三、高温粘度标准及高温粘度计的标定	(293)
1. 高温粘度标准物质	(293)
2. 高温标准物质的定值方法.....	(294)
3. 高温粘度计的标定方法	(296)
第七章 粘度标准与量值传递	(297)
一、纯水的粘度	(297)
二、粘度基准与标准	(304)
1. 粘度基准与标准装置	(304)
2. 粘度基准与标准的建立方法	(308)
3. 粘度标准液	(309)
三、粘度计量误差(以毛细管法为例)	(321)
1. 误差源.....	(321)
2. 不确定度的估计	(323)
3. “时间偏差”与“平行偏差”	(324)
四、粘度量值传递与量值比对	(325)
1. 检定系统.....	(325)
2. 量值传递.....	(325)

3. 量值比对	(327)
五、粘度计的检定方法	(329)
1. 一般检定方法介绍	(329)
2. 毛细管粘度计的检定	(330)
3. 旋转粘度计的检定	(332)
4. 滚落式落球粘度计的检定	(333)
5. 恩氏粘度计的检定	(334)
6. ISO杯的检定	(335)
六、国外粘度计量	(337)
1. 基、标准装置	(337)
2. 粘度标准液	(337)
3. 粘度量值传递	(338)
附录 流变学基本术语	(339)
参考文献	(378)

第一章 流体的粘度

一、(动力)粘度

1. (动力)粘度的概念

流体的流动是在重力或外力作用下的连续变形过程。当流体在管道中流动时，管中心轴处的流速最快，越近管臂流速越慢如图 1-1。在河里流动的水，于河中央水面处流速最快，越近河床及河岸流速越慢。当物体在静止的液体中旋转时，周围的液体也跟着旋转，如图 1-2。一旦物体停止转动，旋转的液体也会慢慢静止下来。又如，将一外筒用细丝吊挂在空气中，使与其同轴但互不接触的内筒旋转时，外筒也会发生偏转，如图 1-3。这些都说明流体流动时内部各部分的速度是不相同的，流层间存在着速度差，而且流体的运动在逐层传递。

流体流动时流层间存在着速度差和运动的传递是由于流体具有粘性。这也是流体与固体的最重要区别。固体运动时各质点的速度相同，也没有运动的传递。当相邻流层存在着速度差时，快速流层力图加快慢速流层，而慢速流层则力图减慢快速流层，这种相互作用随层间速度的增加而加剧，流体所具有的这种特性就是粘性，流层间的这种（力图减小速度差的）作用力称为内摩擦力或粘性力。

流体的粘性实质上是流体分子微观作用的宏观表现。可以从分子运动论来解释。

气体具有粘性是由于动量传递。气体分子间的距离大，

1107273

1

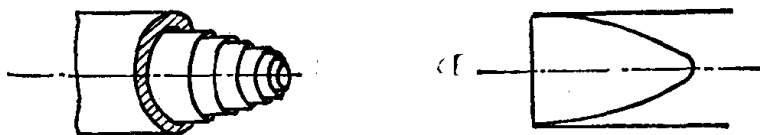


图 1-1

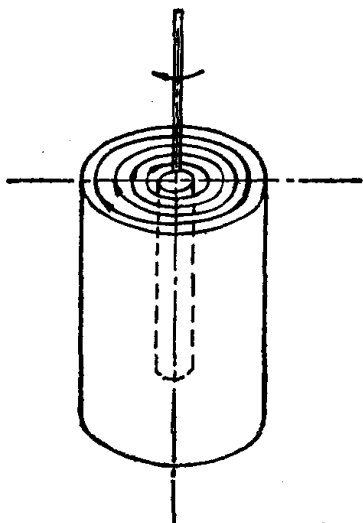


图 1-2

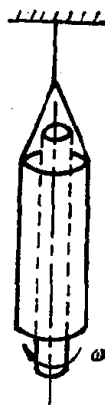


图 1-3

当气体流动时,其分子除了朝力的方向运动外,分子的无规则运动也较剧烈。当处于快层的分子(它们具有较大的动量)由于热运动而迁移到慢层时,就把比较大的动量传给具有较小动量的慢层分子而将其加速,当慢层的分子迁移到快层时,则将使快层分子的动量减小而减速。

液体具有粘性是由于分子引力所致。液体分子间的引力比气体小得多,分子的热运动远不如气体剧烈,几乎没有动量传递,但分子间的引力则远比气体大。当液体流动时,由于分子引力,快层的分子力图拉着慢层的分子前进,而慢层

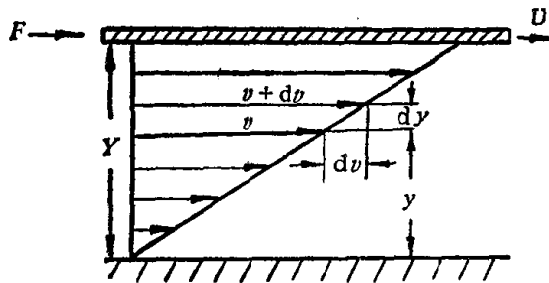
的分子则尽量将快层分子往后拽。

流体分子间的这些相互作用使得运动得以逐层传递，并保持着层间的速度差，即呈现流体的粘性。

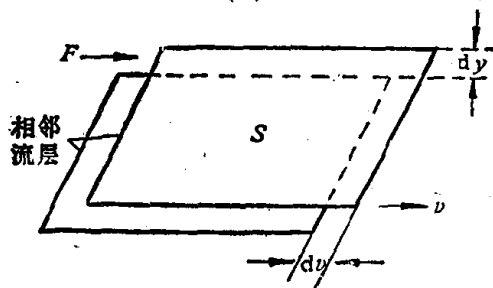
粘度*是粘性的程度，也称动力粘度、粘（滞）性系数、内摩擦系数。不同物质粘度不同。例如在常温（20℃）及常压下空气的粘度为 0.018 mPa·s，汽油为 0.65 mPa·s，水为 1 mPa·s，血液（37℃）为 4~15 mPa·s，橄榄油为 10^2 mPa·s，蓖麻油为 10^3 mPa·s，蜂蜜为 10^4 mPa·s，焦油为 10^6 mPa·s，沥青为 10^8 mPa·s 等等。粘度还与温度、压力等因素有关。

2. 牛顿粘性定律

牛顿粘性定律给出了粘度与内摩擦力的定量关系。如图



(a)



(b)

图 1-4

*英文粘度与粘性是同一词 (viscosity)

1-4 所示,在两平行平板间充满液体,下板固定不动,施一恒定力于上板使其作平行于下板的匀速运动,此时介于两板间的液体也由静止变成运动状态,紧贴上板的液体附着在上板与其等速 (v) 向前运动,最下层的液体贴着下板不动 (速度为零),中间的液体越近上板速度越快,越近下板速度越慢,运动由上逐层向下传递,形成如图 1-4 的速度分布。

设相邻流层间的接触面积为 S , 距离为 dy , 速度差为 dv , 则流体的粘性力为:

$$F = \eta S \frac{dv}{dy} \quad (1-1)$$

式中: F ——粘性力又称内摩擦力,

S ——流层间的接触面积;

$\frac{dv}{dy}$ ——速度梯度又称剪切速率;

η ——流体的 (动力) 粘度。

式 (1-1) 亦可写成如下形式:

$$\tau = \eta D \quad (1-2)$$

式中: τ ——剪切应力, 等于 F/S ;

D ——剪切速率, 等于 $\frac{dv}{dy}$ 。

公式 (1-1) 及 (1-2) 是牛顿定律的两种表示方法。在流变学中也称公式 (1-2) 为本构方程。即描述剪切应力与剪切速率 (以及时间等) 之间关系的方程。

3. (动力) 粘度的定义及单位

(1) 定 义

定性地说, (动力) 粘度是流体对形变的抵抗随形变速率的增加而增加的性质。

定量地说，(动力) 粘度是稳定流中的剪切应力与剪切速率之比值，即：

$$\eta = \tau / D \quad (1-3)$$

(2) 单 位

(动力) 粘度的 SI 单位为 Pa·s，中文符号为帕·秒，中文名称为帕斯卡秒。常用其分数单位 dPa·s (分帕·秒) 及 mPa·s (毫帕·秒)。

(动力) 粘度的量纲为 $[ML^{-1}T^{-1}]$ 。

二、运 动 粘 度

(1) 定 义

运动粘度是动力粘度与同温度下的密度之比值。又称比密粘度。用符号 ν 表示，即：

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1-4)$$

运动粘度这个量在实际应用及测量方面有许多方便之处，例如，在许多流体力学计算（如雷诺数的计算）中，用 ν 比用 η 更方便；许多条件粘度与运动粘度之间比较容易建立经验换算式——数值方程；利用重力型玻璃毛细管粘度计可以很方便地测得运动粘度。

这里需要指出的是不能用运动粘度来衡量流动阻力的大小（而动力粘度才是流动阻力的度量）。例如，20℃ 水的动力粘度为 1.002 mPa·s，比空气的动力粘度 0.018 mPa·s 大 55.7 倍（我们深感在水中行走要比在空气中难得多）。但由于 20℃ 水的密度为 0.998 2 g/cm³ 比空气的密度 0.001 2 g/cm³ 大 832 倍，所以 20℃ 时空气的运动粘度 15 mm²/s 竟然比水的运动粘度 1.003 8 mm²/s 大 15 倍。

表 1-1 粘度的定义、量纲及单位

量	定义	量纲	单位及其换算系数			
			名称	符号	Pa·s (N·s/m ²) (kg/m·s)	dPa·s
η	$\eta = \frac{\tau}{D}$	$[ML^{-1}T^{-1}]$	帕斯卡秒 (帕·秒)	1	10	1000
			分帕斯卡秒 (分帕·秒)	0.1	1	100
			毫帕斯卡秒 (毫帕·秒)	0.001	0.01	1
ν	$\nu = \frac{\eta}{\rho}$	$[L^2T^{-1}]$	二次方米每秒 (米 ² /秒)	m ² /s	cm ² /s	mm ² /s
			二次方厘米每秒 (厘米 ² /秒)	1	1 × 10 ⁻⁴	1 × 10 ⁶
			二次方毫米每秒 (毫米 ² /秒)	1 × 10 ⁻⁴	1	100
ρ^*	$\rho = \frac{m}{V}$	$[ML^{-3}]$	千克每立方米 (千克/米 ³)	kg/m ³	g/cm ³	mg/mm ³
			克每立方厘米 (克/厘米 ³)	1	1 × 10 ⁻³	1 × 10 ⁻³
			毫克每立方毫米 (毫克/毫米 ³)	1 × 10 ³	1	1
单位之间的关系			$\frac{Pa \cdot s}{g} = \frac{cm^2}{cm^3} \cdot \frac{s}{s}$	$\frac{dPa \cdot s}{g} = \frac{cm^2}{cm^3} \cdot \frac{s}{s}$	$\frac{mPa \cdot s}{mg} = \frac{mm^2}{mm^3} \cdot \frac{s}{s}$	

* 因密度 ρ 与 η 及 ν 的换算关系，故也列入此表。