

〔日〕川田 裕郎 著  
陈 惠 钊 译

# 粘 度



计 量 出 版 社

52.73  
113  
C.2

# 粘 度

(修 订 本)

〔日〕 川田 裕郎 著

陈惠钊 译 杨大海 校

3452/03

科学出版社

## 内 容 提 要

本书深入浅出地介绍了粘度的基本知识,各种流体的流动特性,以及毛细管法、落球法、旋转法、平板法、振动与超声法测量流体粘度(牛顿及非牛顿粘度)的理论基础、测量原理、测量方法及粘度计量管理上的注意事项。

本书可供石油、化工、纺织、轻工、国防、交通、机械、电力、食品、医学等部门和工矿企业、科研单位有关人员以及有关高等院校师生参考。

〔日〕 川田 裕郎 著

粘 度

(改 订)

コロナ社, 1978

粘 度

(修订本)

〔日〕 川田 裕郎 著

陈惠钊 译 杨大海 校

—

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—

开本 787×1092 1/32 印张 5 7/8

字数 130 千字 印数 1—9,000

1981年3月第一版 1981年3月第一次印刷

统一书号 15210·40

定价 0.90 元

科技新书目: 179—107

## 原 出 版 者 的 话

当前,人们对计量管理工作的重视与日俱增,工厂、现场中的计量仪器以及操作的自动化也在迅速发展,从而大大地推动了产业管理的合理化,这是众所周知的。而在施工现场加强计量管理的思想和计量技术的普及也是很明显的。

但是,科学技术的急剧发展,一方面使历来所涉及的各种量的测量技术和计量仪器得到了很大的进步,另一方面,对新的状态量,例如粘度、色彩、光洁度、光泽等发展到有必要进行计量管理的程度;又如,由于原子物理学的发展,为放射性同位素在计量方面的利用开辟了广阔的领域。因此,对于使用新技术或计量仪器的管理人员及技术人员,必须首先学会选择适合于管理规模和作业内容的计量仪器,掌握计量仪器的正确安装、维护管理以及有关法律上的约束和标准等全面的知识和技术。

然而,在计量领域中以往所涉及到的量很少有通俗易懂的专业书,而且有关新技术方面的实用性参考书目前也未出版,鉴于这种现状,有关方面一再向本协会发出呼吁要求出版有关书籍。

这套计量管理技术丛书,就是为了满足这方面的要求而计划出版的。并且要防止像以前有些书那样在一本书中收集太多的内容,也要避免受篇幅的限制,不偏于理论而以现场技术为重点加以通俗易懂地叙述,并且以实用的国产仪器作为重点外,还特别着重于从各产业生产管理 的角度来解释,尽量不偏向于只谈计量仪器的管理问题。本书的作者既是对一切现场技术具有丰富经验的专业实干家,也是第一线

的技术工作者。

根据以上目的，希望本书可作为工厂、现场的一切管理人员、技术人员以及学生等的参考书并得到有效的利用。

社团法人 计量管理协会

1958年11月

## 修 订 版 说 明

自从计量管理技术丛书创办以来，本书初版发行后已过10年。在这10年间，日本的科学和工业技术发展令人瞠目。与此同时，粘度测定技术也有很大的进步。特别是注意到了包括工业用粘度计在内的新式粘度计的研制，对非牛顿粘度等复杂的流动性测定的普遍化，粘度标准液的实用化等几个方面的新动向。当然，也还存在着许多应该研究的问题，所以今后的继续发展自不待言。在这里，考虑了这些最新的动向，对新的已实用化的粘度计加以说明，对非牛顿粘度的测定方法和粘度标准液等问题就便说明，我认为这本书会给读者以方便，所以又作了修订。

另外，与初版发行的时候相比，最近在使用专业用语上已经达到相当的统一。因此，利用本书修订的机会以“高分子学会编：《流变学手册》，1965年（丸善书店出版）”一书中所使用的术语为基础，把专业词汇统一起来。

川田 裕郎

1969年2月

## 前 言

在写这本书的时候，最初的打算是不限于牛顿粘度的测定，也想涉及广义的粘度测定，即非牛顿粘度、塑性粘度、屈服值或触变性、粘弹性等的测定，然而在写的过程中觉得预定篇幅有限，加上对于如何编写得简明易懂也缺乏自信，因此改变了最初的想法，决定只停留于牛顿粘度测定这个内容上。

但是在做这些粘度测定时，如果不了解非牛顿性、粘弹性等流体的种种流动性，就不能充分活用其测定结果。因此对于这些（非牛顿特性）也给予简单的说明。

另外，对于那些需要深入学习的人们来说，我想以列参考文献的方法为好，因而综括列在书末。可以以这些文献为基础，再深入查阅更多的有关文献。尽量只列新的代表性的文献以免过于繁杂。

当这本书完稿之际仍担心是否符合编辑的原意，如果能对读者们稍有一点参考价值，则是幸甚了。

川田 裕郎

1958年 11 月

# 目 录

## 1. 粘度测定的基础

|                          |        |
|--------------------------|--------|
| 1.1 粘度 .....             | ( 1 )  |
| 1.2 运动粘度 .....           | ( 5 )  |
| 1.3 牛頓流体和非牛頓流体 .....     | ( 7 )  |
| 1.4 非牛頓流体的粘度 .....       | ( 9 )  |
| 1.5 触变性流体 .....          | ( 11 ) |
| 1.6 粘弹性体 .....           | ( 13 ) |
| 1.7 流体的粘度和温度、压力的关系 ..... | ( 16 ) |

## 2. 细管法的粘度测定

|                            |        |
|----------------------------|--------|
| 2.1 細管中的粘性流动和测定原理 .....    | ( 18 ) |
| 2.1.1 哈根-泊肃叶定律 .....       | ( 18 ) |
| 2.1.2 在細管中的流动和雷诺数 .....    | ( 20 ) |
| 2.1.3 細管的直线性和内径的一致性 .....  | ( 22 ) |
| 2.1.4 压缩性流体在細管中流动的情况 ..... | ( 25 ) |
| 2.1.5 在細管内壁的滑动 .....       | ( 26 ) |
| 2.1.6 細管入口处的流动和动能修正 .....  | ( 29 ) |
| 2.1.7 绝对测定和相对测定 .....      | ( 32 ) |
| 2.2 毛細管粘度计的粘度测定 .....      | ( 33 ) |
| 2.2.1 毛細管粘度计的构造和使用方法 ..... | ( 33 ) |
| 2.2.2 毛細管粘度计的设计 .....      | ( 39 ) |
| 2.2.3 测定方法 .....           | ( 42 ) |
| 2.2.4 误差和修正 .....          | ( 45 ) |
| 2.3 短管粘度计的粘度测定 .....       | ( 51 ) |
| 2.4 細管式連續粘度计的粘度测定 .....    | ( 60 ) |
| 2.5 細管法的非牛頓粘度测定 .....      | ( 63 ) |
| 2.5.1 非牛頓流体在細管中的流动 .....   | ( 64 ) |



|                            |        |
|----------------------------|--------|
| 2.5.2 非牛頓粘度的測定原理 .....     | ( 69 ) |
| 2.5.3 用于非牛頓流體的細管粘度計 .....  | ( 71 ) |
| <b>3. 落體法的粘度測定</b>         |        |
| 3.1 落球粘度計的粘度測定 .....       | ( 78 ) |
| 3.1.1 測定原理 .....           | ( 78 ) |
| 3.1.2 球的直徑和粘度的測定範圍 .....   | ( 81 ) |
| 3.1.3 末端速度 .....           | ( 82 ) |
| 3.1.4 管壁的影響 .....          | ( 85 ) |
| 3.1.5 落球粘度計的構造 .....       | ( 88 ) |
| 3.1.6 測定方法 .....           | ( 91 ) |
| 3.1.7 球在非牛頓流體中落下的情況 .....  | ( 93 ) |
| 3.2 滾動落球粘度計的粘度測定 .....     | ( 94 ) |
| 3.2.1 測定原理 .....           | ( 94 ) |
| 3.2.2 構造和測定方法 .....        | ( 98 ) |
| 3.3 其他落體粘度計的粘度測定 .....     | (101)  |
| 3.3.1 氣泡粘度計的粘度測定 .....     | (101)  |
| 3.3.2 圓柱落下粘度計的粘度測定 .....   | (103)  |
| 3.3.3 落體式連續粘度計的粘度測定 .....  | (106)  |
| <b>4. 旋轉法的粘度測定</b>         |        |
| 4.1 旋轉圓筒粘度計的粘度測定原理 .....   | (110)  |
| 4.1.1 測定原理 .....           | (110)  |
| 4.1.2 層流和雷諾數的關係 .....      | (112)  |
| 4.1.3 底面的影響 .....          | (114)  |
| 4.2 同軸雙重圓筒旋轉粘度計的粘度測定 ..... | (118)  |
| 4.2.1 同軸雙重圓筒旋轉粘度計的構造 ..... | (118)  |
| 4.2.2 測定方法 .....           | (121)  |
| 4.2.3 誤差的原因 .....          | (122)  |
| 4.3 單一圓筒旋轉粘度計的粘度測定 .....   | (123)  |
| 4.3.1 測定原理 .....           | (123)  |
| 4.3.2 測定方法 .....           | (127)  |
| 4.4 用旋轉圓筒粘度計作非牛頓粘度測定 ..... | (128)  |

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 4.5 旋转圆板粘度计的粘度测定 .....     | (133) |
| 4.6 锥-板粘度计的粘度测定 .....      | (136) |
| <b>5. 平板法的粘度测定</b>         |       |
| 5.1 带形粘度计 .....            | (139) |
| 5.2 平行板粘度计 .....           | (140) |
| 5.3 倾斜板粘度计 .....           | (145) |
| <b>6. 振动法的粘度测定</b>         |       |
| 6.1 旋转振动粘度计的粘度测定 .....     | (147) |
| 6.2 振动片粘度计的粘度测定 .....      | (152) |
| 6.2.1 测定原理 .....           | (152) |
| 6.2.2 振动片粘度计的构造和测定方法 ..... | (155) |
| <b>7. 粘度管理上的注意事项</b>       |       |
| 7.1 粘度计的选择 .....           | (160) |
| 7.1.1 细管法 .....            | (161) |
| 7.1.2 落体法 .....            | (163) |
| 7.1.3 旋转法 .....            | (165) |
| 7.1.4 平板法 .....            | (167) |
| 7.1.5 振动法 .....            | (168) |
| 7.2 粘度标准和粘度标准液 .....       | (169) |

## 参 考 文 献

## 1. 粘度测定的基础

最近在各种工业部门中，从工程的管理上及其他方面的需要，都感到粘度测定的必要性，因而开始进行各种流体的粘度测定，但对它的利用仅仅是迈出了第一步，我们认为随着今后工业的发展，粘度测定的利用范围将会逐步扩大。

在石油油脂工业、涂料与墨水工业、合成树脂与合成纤维等合成化学工业、食品工业和制药工业等部门都需要粘度测定，这是不言而喻的，在其他工业部门中也同样，只要涉及流体的处理，即或其必要性有程度的差别，但在许多场合下也都感到需要知道流体的粘度。

测定粘度时，需要知道有关流体流动的种种性质。调查一下各种流体的流动形式，可知有显示牛顿性、非牛顿性、触变性、粘弹性等等不同的流动性质。对具有复杂流动性的流体来说，由于使用的粘度计不同所测得的粘度值不同，这种场合所测定的结果是无用的。因此，在测定粘度时，首先需要考虑流体的流动性。

下面就粘度和运动粘度的单位，以及测定粘度时的基本事项加以说明，同时简单叙述有关流体流动的种种性质。

### 1.1 粘 度

将水放在圆筒容器中使之旋转运动，然后放置不动，过一会儿便变为静止状态。处于运动状态的液体随着时间的经过而变成静止状态，这说明流体具有所谓粘性的性质。即，在流体的内部相互接触的部分，在其切线方向的速度有差别时，会产生减小其速度差的作用，这是因为流速快的部分要加速与其相接触的流速慢的部分，而流速慢的部分要减慢与

其相接触的流速快的部份，流体的这种性质称做粘性。

我们再看看容器中的水在旋转运动之时，以及容器中的重油在旋转运动时的情况，便可看到重油达到静止状态要比水快得多。这是由于重油的粘性程度（粘度）与水的粘性程度（粘度）不同之故。我们认为，这种场合是因为重油比水粘（或者叫做粘度高，或粘度大）。

那么，让我们来考虑一下，如何用数量来定量地表示粘性的程度呢？现在，如图 1.1 所示，在两平行平面间充满了流体。假设，下平面以速度  $v_1$ 、上平面以速度  $v_2$  向同一个方向移动，上下两平面间的距离  $\Delta y$  始终保持一定。在这里假定与上下平面相接触的流体分别粘着在平面上没有滑动、与平面的速度相同并向同一个方向移动，则两平面间流体的流速为：接近下平面的流速为  $v_1$ ，愈靠近上面的流体愈逐次增加速度，在接触上平面的流体流速达  $v_2$ ，则产生如图 1.1 所示的速度差。如果流动速度不太大的话，则形成流线与两个平面平行的层状流动（这样的流动叫做层流，与此相对的混乱的流动称为紊流），这时两平面间流体速度的变化量与  $y$  轴方向的距离成正比。

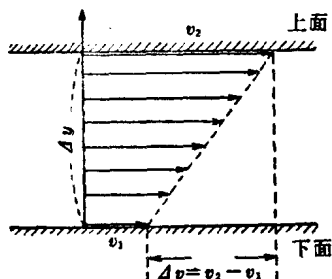


图 1.1 两平面间的粘性流动

这时，在距离为  $\Delta y$  的两平面间，由于流速从  $v_1$  变到  $v_2$ ，假定单位距离的流速变化量为  $D_s$ ，则

$$D_s = \frac{v_2 - v_1}{\Delta y} = \frac{\Delta v}{\Delta y} \rightarrow \frac{dv}{dy} \quad (1.1)$$

这里  $\Delta v = v_2 - v_1$ 。

$D_s$  值越大, 流速的变化率越大, 一般把  $D_s$  叫做速度梯度或切速率 (或剪切速率)。

那么, 如上所述, 当在流体中具有这种速度梯度时, 流速大的流体具有加速与之接近的流速慢的流体的力 (或流速小的流体具有减速与之接近的流速快的流体的力), 即产生了粘性力, 这一力以速度梯度加大而增大, 而且流速不同的两流层接触面积越大这个力越大。

在普通状态下, 水等物质的粘性力  $F$  与速度梯度  $D_s$  成正比, 并与流速不同的两流层接触面积  $A$  成正比。所以对这种流体, 它们之间的关系可用下面的 (1.2) 式表示。

$$F = \eta A D_s \quad (1.2)$$

这个比例常数  $\eta$  称为粘度或粘性系数, (1.2) 式的关系称为牛顿粘性定律。

这个关系式成立的流体, 当流速不同的两个流层接触面积  $A$  和速度梯度  $D_s$  恒定时, 粘度  $\eta$  越大的流体, 作用于接触面上的粘性力越大, 总之  $\eta$  越大的流体越粘。即, 可以用  $\eta$  的值在数量上表示流体的粘性程度。

当距离 1 厘米的流速变化量为 1 厘米·秒<sup>-1</sup> 时, 即  $D_s = 1 \text{ 秒}^{-1}$  的速度梯度时, 作用在 1 平方厘米面积上的力为 1 达因的流体具有 1 泊 (Poise, 略号为 P) 的粘度。换言之, 这样的流体的粘度  $\eta$  为 1 泊。如果有粘度为 2 泊的流体, 在同一状态下的作用力当然是前者的两倍。

从 (1.2) 式得

$$\eta = F / A D_s \quad (1.3)$$

因此,

$$\text{泊} = \frac{\text{达因}}{(\text{厘米}^2)(\text{秒}^{-1})} = \frac{\text{克}}{\text{秒} \cdot \text{厘米}}$$

泊的  $1/100$  称为厘泊（略号为 cP）， $1/1000$  称为毫泊（略号为 mP）。

泊的语源是由最早采用毛细管方法系统地研究粘性阻力的法国著名科学家泊肃叶〔Poiseuille (1797~1869)〕的名字而来的<sup>1)</sup>。

日本计量法所规定的单位制是以国际单位制为根据的，因此粘度的单位也用 MKS 制规定，即采用“牛顿·秒每平方米 ( $N \cdot s/m^2$ )”。然而，现在仍然广泛采用“泊”，所以可把它作为辅助单位按历来的习惯继续使用。

按计量法对粘度的单位定义为：“所谓牛顿·秒/米<sup>2</sup>是指在流体内每 1 米距离有 1 米/秒速度差的速度梯度时，在垂直于该速度梯度方向的面上，沿速度方向每 1 平方米面积产生 1 牛顿（1 牛顿为 100000 达因）力的应力时的粘度”，1 牛顿·秒/米<sup>2</sup>的粘度相同于 10 泊的粘度。

在工业上也有用“千克重·秒每平方米 ( $kgw \cdot s/m^2$ )”作为粘度单位的，这个单位和泊的关系是：

$$1 \text{ 千克重} \cdot \text{秒}/\text{米}^2 = 98.0665 \text{ 泊} \approx 98.1 \text{ 泊}$$

有时也用粘度的倒数来表示粘性的程度（不如说是流动的容易程度），称它为流动度，其单位用 rhe 表示。

$$1 \text{ rhe} = 1/\text{泊}$$

各种流体都显示上述的粘性，那么为什么会有这种性质呢？我们在这里稍加说明以下两点原因：

(i) 流动快的部分（或慢的部分）的分子跑进与其接触的流动慢的部分（或快的部分）中去，力图使全体的流速变成一样而产生的阻力。

(ii) 由于具有不同流速的互相接触的流层的分子间引力所产生的阻力。

\* 右上角的数字表示书末参考文献的编号。

如表 1.1 中所示，空气粘度随温度的升高而增大，对于气体来说，它的粘性主要是由分子的交换引起的，即随着温度的上升，分子的热运动激烈，流层间的分子交换增多，粘度就变大。水等液体则相反，温度升高，粘度下降。其原因可以认为是液体的粘度主要是基于分子间的引力所致，随温度上升其引力减弱。

表 1.1 空气和水在各温度下的粘度

| 温 度 [°C] | 空气的粘度 [泊] | 水的粘度 [泊] |
|----------|-----------|----------|
| 0        | 0.00017   | 0.018    |
| 20       | 0.00018   | 0.010    |
| 100      | 0.00023   | 0.0028   |

## 1.2 运动粘度

在研究物体在流体中的运动状态或物体所受到的阻力时，以及研究流动流体的流动形式等场合，一般不能忽视流体粘度的影响，而对于这样的流体力学问题，一般都受运动粘度这个量支配，它是由粘度  $\eta$  被具有这个粘度状态下的流体密度  $\rho$  除得的量，一般用  $\nu$  表示

$$\nu = \eta / \rho \quad (1.4)$$

例如，如前所述，流动的状态有层流和紊流，而由实验得知，当雷诺数（详细参阅 2.1.2 项）在某值以下为层流，超过此值就会变为紊流，因此求出雷诺数就可以判别流动呈什么状态。这时为了求雷诺数，就必须知道流体的粘度  $\eta$  和密度  $\rho$ ，而实际上是以  $\eta/\rho$  的形式表现的，因此不必分别求出  $\eta$  和  $\rho$ ，只要求  $\nu$  即可。

其详细情况将在后面叙述，在此若用自由流下式的毛细管粘度计（参阅 2.2 节）测定粘度时，求得的是  $\eta/\rho$  的值，

为求粘度  $\eta$  必须另外测定流体的密度，有时用  $\nu$  这个量较为方便。把这个  $\nu$  叫做运动粘度，例如粘度  $\eta$  为 1 泊，在具有这个粘度的状态下流体的密度为 1 克/厘米<sup>3</sup> 的流体运动粘度叫做 1 斯托克斯 (Stokes, 略号为 St)，一般简称为斯。由

(1.4) 式得

$$\text{斯} = \frac{\text{泊}}{\text{克/厘米}^3} = \frac{\text{厘米}^2}{\text{秒}}$$

斯的 1/100 称为厘斯 (略号为 cSt)。

在表 2 中示出各种温度下水的粘度、运动粘度和密度的值。

在国际单位制和计量法中，基于 MKS 制的运动粘度单位采用“平方米每秒[m<sup>2</sup>/s]”。由计量法规定“1 米<sup>2</sup>/秒是密度为 1 公斤/米<sup>3</sup>时，粘度为 1 牛顿·秒/米<sup>2</sup> 的流体的运动粘度”。斯作为运动粘度的辅助单位使用。1 平方米每秒等于 10000 斯。

表 1.2 蒸馏水在各种温度下的粘度、运动粘度和密度

| 温 度<br>(℃) | 粘 度<br>(厘泊) | 运动粘度<br>(厘斯) | 密 度<br>(克/<br>厘米 <sup>3</sup> ) | 温 度<br>(℃) | 粘 度<br>(厘泊) | 运动粘度<br>(厘斯) | 密 度<br>(克/<br>厘米 <sup>3</sup> ) |
|------------|-------------|--------------|---------------------------------|------------|-------------|--------------|---------------------------------|
| 0          | 1.792       | 1.792        | 0.99984                         | 55         | 0.505       | 0.512        | 0.98570                         |
| 5          | 1.520       | 1.520        | 0.99996                         | 60         | 0.467       | 0.475        | 0.98321                         |
| 10         | 1.307       | 1.307        | 0.99970                         | 65         | 0.434       | 0.443        | 0.98057                         |
| 15         | 1.138       | 1.139        | 0.99910                         | 70         | 0.404       | 0.413        | 0.97778                         |
| 20         | 1.002       | 1.0038       | 0.99820                         | 75         | 0.378       | 0.388        | 0.97486                         |
| 25         | 0.890       | 0.893        | 0.99705                         | 80         | 0.355       | 0.365        | 0.97180                         |
| 30         | 0.797       | 0.801        | 0.99565                         | 85         | 0.334       | 0.345        | 0.96862                         |
| 35         | 0.719       | 0.724        | 0.99403                         | 90         | 0.315       | 0.326        | 0.96532                         |
| 40         | 0.653       | 0.658        | 0.99221                         | 95         | 0.298       | 0.310        | 0.96189                         |
| 45         | 0.598       | 0.604        | 0.99022                         | 100        | 0.282       | 0.295        | 0.95835                         |
| 50         | 0.548       | 0.554        | 0.98805                         |            |             |              |                                 |

\* 原文误印成厘米<sup>3</sup>——译者注



### 1.3 牛顿流体和非牛顿流体

如前所述,服从牛顿粘性定律的流体,可用(1.2)式表示其剪切速率和此时所产生的粘性力的关系,以其比例常数 $\eta$ 值的大小来比较粘度的大小,这里把(1.2)式改写成如下的形式

$$\tau = \eta D_s \quad (1.5)$$

这里,

$$\tau = F/A$$

这个 $\tau$ 是作用在面积 $A$ 上的力 $F$ 被其面积 $A$ 除得的值,即作用在单位面积上的力,称之为剪切应力。

若把剪切应力作为纵轴,将剪切速率作为横轴,图示(1.5)式的关系时,则如图1.2所示,为通过原点的直线,设此直线和横轴的夹角为 $\theta$ ,则

$$\tan \theta = \frac{\tau}{D_s} = \eta \quad (1.6)$$

因此,对于这种流体,测定其任意剪切速率和相对应的剪切应力,取其比而求得粘度,粘度越高的流体,直线与横轴之间的夹角越大。

如此,剪切速率和对应的剪切应力的关系为通过原点的直线关系的流体,即服从牛顿粘性定律的流体叫做牛顿流体。与此相反,剪切速率和对应的剪切应力的关系不成直线关系的流体,即不服从牛顿粘性定律的流体叫做非牛顿流体,如塑料、油漆及其他粘度比较高的流体都属于非牛顿流体。

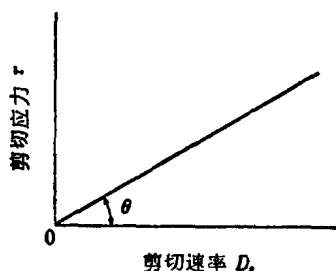


图1.2 牛顿流体的 $D_s$ 和 $\tau$ 的关系

图1.3示出了各种非牛顿流体 $D_s$ 和 $\tau$ 的关系。