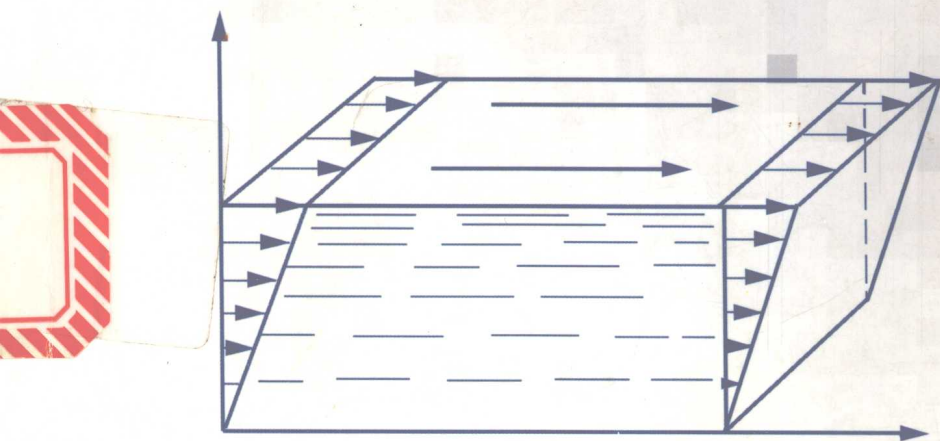


陈惠钊
编著

粘度测量

NIANDU CELIANG

修订版

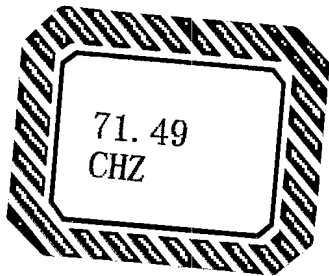
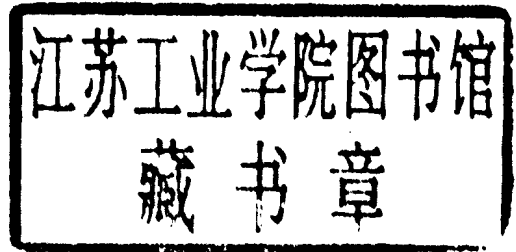


中国计量出版社

粘度测量

(修订版)

陈惠钊 编著



中国计量出版社

图书在版编目(CIP)数据

粘度测量/陈惠钊编著. —修订本. —北京:中国计量出版社,2002.12

ISBN 7-5026-1688-8

I. 粘… II. 陈… III. 粘度计量 IV. TB933

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 080543 号

内 容 提 要

本书简要介绍了粘度基本知识,较详细论述了包括毛细管法、旋转法、落体法、振动法等各种测量牛顿流体粘度的原理与方法,扼要叙述了非牛顿流体及其流变特性测量方法,对于高温熔体的粘度和工业流程在线粘度测量及国内外粘度计量基、标准也作了专门介绍。

本书可供从事粘度研究、计量测试、实验室分析人员、大专院校有关专业的师生参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

E-mail jlfxb@263.net.cn

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm × 1092 mm 16开本 印张 22.5 字数 543千字

2003年2月第2版 2003年2月第2次印刷

*

印数 3 001—6 000 定价: 45.00 元

前 言

粘度及其测量在国民经济的许多领域有着较广泛应用,例如在石油(原油开采与输送、石油产品的质量评定、油品的混合等)、化工(油漆、涂料、粘合剂、三大合成材料——塑料、橡胶、合成纤维等)、交通、国防(燃料油、润滑油、沥青等)、轻工(纺织、造纸、化妆品等)、食品(奶油、巧克力、果酱等)、建材(玻璃、陶瓷、水泥等)、煤炭、冶金(熔融金属与矿渣等)、航天(火箭燃料等)、医药(药品、血液、体液等)等领域中,粘度测量是控制生产流程、保证安全生产、控制与评定产品质量、医学诊断及科学研究的重要手段。然而相关的参考书在国内却极少,与这方面的知识需求很不适应。这些年来随着我国经济改革的深入及科学技术的进步,相关领域里粘度计量测试及质量控制越来越得到重视,粘度测量方法与测量技术也有不少新发展。

应中国计量出版社的恳诚约稿,笔者对本书初版进行了修订。修订版对一些章节作了较大的改动与内容补充,如第五章除了补充非牛顿流体的触变性及屈服应力测量外,增加了粘弹体的基本知识及粘弹性的测量方法,以及血液粘度及其测量法;第八章充实了粘度量值比对及国际粘度计量基、标准的内容,特别介绍了国外粘度计量发展的最新动态。在修订版中还对原来的一些章节作了较合理的调整,如第一章集中介绍粘度基本知识,该章中的其他内容归入第二章及第四章的相关节段。与其他实验室粘度测量相比,工业流程在线粘度测量比较特殊,因而另立一章。在其他各章中都作了章节的调整,并加进了近年来粘度测量的新方法、新技术与新仪器。在附录中增列了国内外有关粘度计量检定规程、粘度测量的国家标准与部门标准目录,增加了部分液体与气体的粘度数据,以供读者查找。

本书(初版及修订版)的出版得到中国计量出版社陈艳春、王红编辑的支持,顺致谢意。

希望本书对从事本专业的读者有所裨益。由于水平所限,书中难免有疏漏与错误之处,敬请读者批评指正。

作者

2003年1月

目 录

第一章 粘度基本知识	(1)
一、流体的粘度	(1)
1. 粘度的概念	(1)
2. 牛顿粘性定律	(2)
3. 粘度的定义及单位	(3)
4. 运动粘度	(3)
二、粘度与温度的关系	(7)
1. 气体的粘温关系	(8)
2. 液体的粘温关系	(12)
三、粘度与压力的关系	(17)
1. 气体粘度与压力的关系	(17)
2. 液体粘度与压力的关系	(22)
四、粘度与剪切速率、剪切时间的关系 (见第五章)	(23)
第二章 毛细管法粘度测量	(24)
一、基本原理	(24)
1. 泊肃叶 (Poiseuille) 定律	(24)
2. 泊氏公式假设条件的讨论	(27)
3. 毛细管法测量原理	(28)
二、重力型毛细管法	(29)
1. 重力型毛细管粘度计	(29)
2. 重力型毛细管粘度计的测量方法	(32)
三、影响因素	(36)
1. 动能修正	(36)
2. 重力加速度	(38)
3. 表面张力	(39)
4. 残留量	(39)
5. 空气浮力	(41)
6. 不同试验温度与检定温度的玻璃热膨胀	(42)
7. 不同试验温度与装液温度的试液热膨胀	(42)
8. 装液量不准确	(42)
9. 粘度计不垂直	(43)
四、加压型毛细管法	(44)
五、高分子溶液粘度及其测量法	(45)
1. 高分子溶液的粘度	(45)

2. 高分子溶液粘度测量法	(47)
六、毛细管法主要配套设备与自动化仪器	(50)
1. 主要设备	(50)
2. 自动毛细管粘度计	(50)
3. 毛细管粘度计自动清洗器	(53)
第三章 旋转法粘度测量	(56)
一、基本原理	(56)
1. 同轴圆筒式	(56)
2. 锥-板式	(60)
3. 圆板式	(62)
4. 双锥式	(65)
5. 双半球式	(66)
6. 双半椭球式	(66)
7. 圆球式	(66)
二、影响因素	(69)
1. 末端效应	(69)
2. 湍流	(74)
3. 二次流	(75)
4. 偏心	(76)
5. 壁滑移	(78)
6. 剪切热(粘性热)	(78)
7. 仪器的热膨胀	(80)
8. 转速变化	(80)
9. 仪器的自身摩擦	(81)
三、旋转粘度计的基本结构	(82)
1. 探测系统	(82)
2. 力矩系统与测矩系统	(82)
3. 驱动系统与测速系统	(84)
4. 定位系统	(85)
5. 恒温系统	(85)
四、实验室旋转粘度计	(86)
1. 控制应力式	(86)
2. 控制速率式	(91)
3. 实验室旋转粘度计的配套设备	(103)
4. 实验室旋转粘度计的一般测量方法	(103)
第四章 其他粘度测量方法	(104)
一、落体法	(104)
1. 落球式	(104)
2. 落柱式	(111)

3. 气泡式	(115)
二、振动法	(117)
1. 扭转振动式	(117)
2. 振动片式	(120)
三、平板法	(122)
1. 滑板式	(122)
2. 带式	(123)
3. 倾斜板式	(123)
4. 压板式(模流式)	(123)
四、粘度杯法	(124)
1. 概述	(124)
2. 各种粘度杯	(124)
3. 流出时间秒、度与运动粘度的关系	(132)
第五章 非牛顿流体及其流变特性测量法	(142)
一、非牛顿流体	(142)
1. 牛顿流体与非牛顿流体	(142)
2. 时间独立性流体	(143)
3. 时间相关性流体	(147)
二、非牛顿粘度测量法	(150)
1. 毛细管法	(150)
2. 同轴圆筒旋转法	(156)
3. 锥-板法	(160)
4. 旋转圆板法	(161)
5. 平板法	(163)
6. 触变性的测量	(165)
7. 屈服应力的测量	(166)
三、粘弹体	(168)
1. 有关概念	(168)
2. 粘弹体	(171)
3. 韦森堡效应与挤出物胀大	(171)
4. 法向应力与法向应力差	(173)
5. 应力松弛	(173)
6. 弹性滞后	(173)
7. 蠕变与回复	(174)
8. 柔量	(175)
9. 线性粘弹性与非线性粘弹性	(175)
10. 力学模型	(176)
11. 不同模型的粘弹性体的蠕变/回复比较	(178)
12. 动态(弹性)模量与动态粘度	(178)

13. 复数(弹性)模量与复数粘度	(182)
四、粘弹性的测量	(184)
1. 法向应力差的测量	(184)
2. 挤出物胀大的测量	(185)
3. 蠕变与回复试验	(185)
4. 动态试验	(188)
5. 各种流变仪简介	(191)
五、血液的流变特性及其测量	(192)
1. 概述	(192)
2. 血液的流变特性	(193)
3. 影响血液粘度的因素	(195)
4. 血液流变参数的正常值	(197)
5. 血液流变特性测量	(198)
第六章 高温粘度测量法	(201)
一、玻璃熔体的粘度及其测量方法	(201)
1. 概述	(201)
2. 玻璃的粘温关系	(201)
3. 旋转法	(205)
4. 升球法	(210)
5. 陷入法	(212)
6. 梁弯法	(214)
7. 纤维伸长法(拉丝法)	(215)
8. 扭曲变形法	(216)
9. 平板法	(217)
10. 玻璃特性温度点测量法	(217)
二、其他高温熔体的粘度测量	(222)
1. 概述	(222)
2. 熔融金属、熔渣、焊渣及煤渣粘度测量法	(222)
三、高温粘度标准及高温粘度计的标定	(222)
1. 高温粘度标准物质	(222)
2. 高温粘度标准物质的定值方法	(225)
3. 高温粘度计的标定方法	(225)
第七章 工业流程在线粘度测量	(227)
一、概述	(227)
1. 在线粘度测量的应用	(227)
2. 在线粘度测量的特点	(227)
3. 在线粘度测量的分类	(228)
二、细管法	(228)
1. 测量原理与方法	(228)

2. 粘度计的设计方法	(231)
三、旋转法	(235)
四、落体法	(238)
1. 活塞式	(238)
2. 浮子式	(239)
五、振动法	(240)
六、粘度杯法	(243)
七、在线粘度计的采样系统与温度补偿系统	(245)
1. 采样系统	(245)
2. 温度补偿系统	(246)
八、在线粘度计的选择	(246)
1. 粘度计的安装形式	(246)
2. 输出信号的形式	(246)
3. 温度控制与温度补偿	(246)
4. 流体的特性	(247)
5. 其他	(247)
第八章 粘度计量基、标准与量值传递	(248)
一、纯水的粘度	(248)
二、粘度计量基准与标准	(252)
1. 基、标准毛细管粘度计	(252)
2. 粘度基准与标准的建立方法	(253)
3. 粘度标准液	(255)
4. 精密恒温槽、测温与计时设备	(259)
三、粘度基、标准的计量误差与不确定度评定	(260)
1. 误差源	(260)
2. 标准不确定度的评定	(261)
3. “时间偏差”与“平行偏差”	(263)
四、粘度量值传递与量值比对	(263)
1. 量值传递	(263)
2. 量值比对	(265)
五、国外粘度计量	(269)
1. 粘度计量基准	(269)
2. 粘度标准液	(275)
3. 粘度量值传递	(275)
六、粘度计量基准的国际发展新动态	(275)
1. 20℃纯水粘度研究的新进展	(275)
2. 推荐作为粘度第二标准液的正壬烷	(280)
3. 粘度测量不确定度评定方法的讨论	(281)
4. 欧洲粘度测量合作计划	(282)

七、粘度计检定方法	(285)
1. 一般检定方法介绍	(285)
2. 毛细管粘度计的检定(要点)	(285)
3. 旋转粘度计的检定(要点)	(287)
4. 滚落式落球粘度计的检定(要点)	(288)
5. 恩氏粘度计的检定(要点)	(289)
6. ISO杯的检定(要点)	(289)
7. 涂-1杯、涂-4杯的检定	(290)
附录 A 粘度标准液的精制与配制	(291)
附录 B 有关检定规程与标准目录	(296)
附录 C 流变学基本术语	(308)
附录 D 某些液体的粘度值	(332)
附录 E 某些气体的粘度值	(342)
主要参考文献	(347)

第一章 粘度基本知识

一、流体的粘度

1. 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，越近管壁流速越慢，如图 1-1。河水在河里流动时，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不相同，流层间存在着速度差，而且流体的运动在逐层传递。



图 1-1

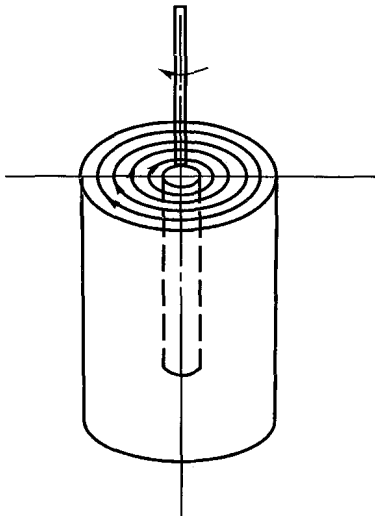


图 1-2

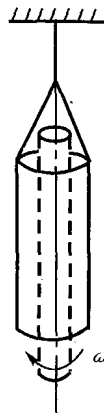


图 1-3

流体流动时流层间存在着速度差和运动的传递正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差的增加而加剧，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，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。液体分子间的距离比气体小得多，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，见表 1-1。粘度还与温度、压力等因素有关。

表 1-1 不同物质的粘度

物质	温度/℃	粘度/mPa·s	物质	温度/℃	粘度/mPa·s
液 H ₂	-253	0.001	蜂蜜	20	10 ⁴
空气	20	0.018	焦油	20	10 ⁶
CO ₂	30	0.05	查德奶酪	20	10 ⁷
CH ₄	-160	0.1	沥青	20	10 ⁸
汽油	20	0.65	沥青	15	10 ⁹
H ₂ O	20	1	玻璃	500	10 ¹²
水银	20	15	铝	25	10 ¹⁷
橄榄油	20	10 ²	地幔	常温	10 ²¹
蓖麻油	20	10 ³			

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 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(速度为 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；

η ——流体的(动力)粘度。

式(1-1)亦可写成如下形式：

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (1-2)$$

式中： τ ——剪切应力，又称切变应力、切应力，等于 F/S ； $= Pa$ 。

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率，又称切变速率、切变率，等于 $\frac{dv}{dy}$ 。 $\frac{m/s}{m} = \frac{1}{s}$

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，本构方程是描述剪切应力与剪切速率(以及时间等)之间关系的方程，也称流变状态方程。

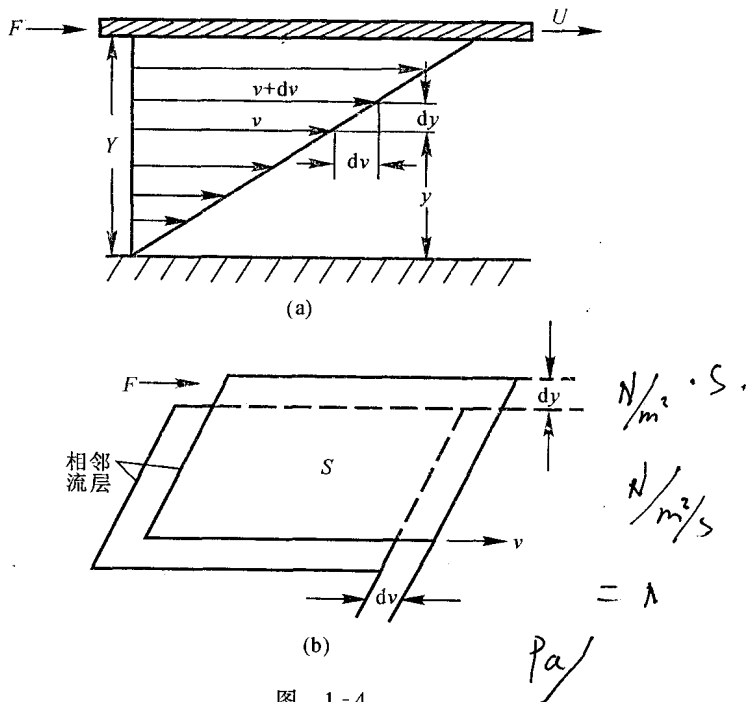


图 1-4

3. 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)粘度是稳态流中的剪切应力与剪切速率之比值，即

$$\eta = \tau / \dot{\gamma} \quad (1-3)$$

(2) 单位

以国际单位制(SI)表示的(动力)粘度单位为 $Pa \cdot s$ ，中文符号为帕·秒，中文名称为帕斯卡秒。常用其分数单位 $dPa \cdot s$ (分帕·秒)及 $mPa \cdot s$ (毫帕·秒)。

(动力)粘度的量纲为 $[ML^{-1}T^{-1}]$ 。

4. 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),下面这组数据(20℃水与空气的动力粘度 η 、运动粘度 ν 与密度 ρ 值)可以说明这些。

$$\begin{array}{lll} \eta_{\text{水}} = 1.002 \text{ mPa}\cdot\text{s} & \eta_{\text{空气}} = 0.018 \text{ mPa}\cdot\text{s} & \eta_{\text{水}} \text{ 比 } \eta_{\text{空气}} \text{ 大 } 55.7 \text{ 倍} \\ \nu_{\text{水}} = 1.0038 \text{ cm}^2/\text{s} & \nu_{\text{空气}} = 15 \text{ cm}^2/\text{s} & \nu_{\text{水}} \text{ 比 } \nu_{\text{空气}} \text{ 小 } 15 \text{ 倍} \\ \rho_{\text{水}} = 0.9982 \text{ g/cm}^3 & \rho_{\text{空气}} = 0.0012 \text{ g/cm}^3 & \rho_{\text{水}} \text{ 比 } \rho_{\text{空气}} \text{ 大 } 832 \text{ 倍} \end{array}$$

可以看出水比空气的动力粘度大得多,而空气比水的运动粘度大得多(这是因为水的密度比空气的大得多之故)。我们在水中行走时明显感到比在空气中行走的阻力大,正是由于水的动力粘度比空气的大,倘若用运动粘度来度量流动阻力那就大错特错。

运动粘度是在重力作用下的流动阻力的度量。

表 1-2 粘度的定义、量纲及单位

量	定义	量纲	符号 单位名称 换算系数	单位及其换算系数		
				Pa·s (N·s/m ²) (kg/m·s)	dPa·s	mPa·s
η	$\eta = \frac{\tau}{D}$	[ML ⁻¹ T ⁻¹]	帕斯卡秒 (帕·秒)	1	10	1 000
			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 ² T ⁻¹]		m ² /s	cm ² /s	mm ² /s
			二次方米每秒 (米 ² /秒)	1	1×10 ⁴	1×10 ⁶
			二次方厘米每秒 (厘米 ² /秒)	1×10 ⁻⁴	1	100
			二次方毫米每秒 (毫米 ² /秒)	1×10 ⁻⁶	1×10 ⁻²	1
ρ *	$\rho = \frac{m}{V}$	[ML ⁻³]		kg/m ³	g/cm ³	mg/mm ³
			千克每立方米 (千克/米 ³)	1	1×10 ⁻³	1×10 ⁻³
			克每立方厘米 (克/厘米 ³)	1×10 ³	1	1
			毫克每立方毫米 (毫克/毫米 ³)	1×10 ³	1	1
单位之间的关系				$\frac{\text{Pa}\cdot\text{s}}{\text{kg/m}^3} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$\frac{\text{dPa}\cdot\text{s}}{\text{g/cm}^3} = \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	$\frac{\text{mPa}\cdot\text{s}}{\text{mg/mm}^3} = \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$

* 因密度 ρ 与 η 及 ν 的换算关系,故 ρ 也列入此表。

表 1-4 运动粘度单位的换算

单位制	单位符号		国际单位制(SI)		物理单位制(CGS)		工程单位制		英制绝对单位制			
	单位名称	换算系数	m ² /s	mm ² /s	St	cSt	m ² /h	in ² /s	ft ² /s	in ² /h	ft ² /h	
国际单位制 (SI)	二次方米每秒		1	1 × 10 ⁶	1 × 10 ⁴	1 × 10 ⁶	3 600.00	1.550 00 × 10 ³	10.763 9	5.580 01 × 10 ⁶	3.875 0 × 10 ⁴	
	二次方毫米每秒		1 × 10 ⁻⁶	1	0.01	1	3.600 00 × 10 ⁻³	1.550 00 × 10 ⁻³	1.076 39 × 10 ⁻⁵	5.580 01	0.038 750	
物理单位制 (CGS)	斯托克斯		1 × 10 ⁻⁴	0.01	1	100	0.360 000	0.155 000	1.076 39 × 10 ⁻³	558.001	3.875 01	
	厘斯托克斯		1 × 10 ⁻⁶	1	0.01	1	3.600 00 × 10 ⁻³	1.550 00 × 10 ⁻³	1.076 39 × 10 ⁻⁵	5.580 01	0.038 750 1	
工程单位制	二次方米每小时		2.777 78 × 10 ⁻⁴	277.778	2.777 78	277.778	1	0.430 557	2.989 98 × 10 ⁻³	1.550 01 × 10 ³	10.763 9	
英制 绝对单位制	二次方英寸每秒		6.451 6 × 10 ⁻⁴	645.160	6.451 6	645.160	2.322 57	1	6.944 45 × 10 ⁻³	8.600 00 × 10 ³	25.000 0	
	二次方英尺每秒		9.290 30 × 10 ⁻²	9.290 3 × 10 ⁴	929.030	9.290 3 × 10 ⁴	334.451	144.000	1	5.184 00 × 10 ⁵	3.600 00 × 10 ³	
	二次方英寸每小时		1.792 11 × 10 ⁻⁷	0.179 211	1.792 11 × 10 ⁻³	0.179 211	6.451 59 × 10 ⁻⁴	2.777 78 × 10 ⁻⁴	1.929 00 × 10 ⁻⁶	1	6.944 45 × 10 ⁻³	
	二次方英尺每小时		2.580 64 × 10 ⁻⁵	25.806 4	25.806 4	25.806 4	0.092 903 0	0.040 000 0	2.777 8 × 10 ⁻⁴	144.000	1	
备注			推行		不采用		不采用				不采用	

(2) 单位

以国际单位制(SI)表示的运动粘度的单位为 m^2/s , 中文符号为米²/秒, 中文名称为二次方米每秒, 常用其分数单位 cm^2/s (厘米²/秒)及 mm^2/s (毫米²/秒)。

运动粘度的量纲为 $[\text{L}^2\text{T}^{-1}]$ 。

动力粘度、运动粘度及密度的定义、量纲、单位及其换算见表 1-2。

另外, 虽然近年来国际单位制在国内已得到了推行, 但由于旧图书及资料的历史延续性, 各种非法定计量单位仍然在应用中经常遇到, 故将动力粘度、运动粘度的 SI 单位与其他单位的关系列于表 1-3 及表 1-4, 以供查找。

二、粘度与温度的关系

粘度与温度的关系非常密切, 在常温常压下, 当温度变化 1°C 时, 液体的粘度变化达百分之几至十几, 气体约为千分之几, 例如在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 时有

$$\Delta\eta_{\text{水}} \approx \pm 2.5\% ;$$

$$\Delta\eta_{\text{矿物油}} \approx \pm 3\% \sim \pm 10\% ;$$

$$\Delta\eta_{\text{硅油}} \approx \pm 2\% \sim \pm 3\% ;$$

$$\Delta\eta_{\text{聚异丁烯}} \approx \pm 10\% ;$$

$$\Delta\eta_{\text{空气}} \approx \pm 0.3\% .$$

粘度与温度并不成线性关系, 它与温度范围有关, 温度越低, 粘温关系越密切, 如图 1-5。又如, 在 0°C , 20°C 及 100°C 下, 当 $\Delta T = \pm 1^\circ\text{C}$ 时, 水的粘度变化, 分别约为 3.4%, 2.5% 及 1.1%。此外, 气体与液体的粘度随温度变化的规律完全相反, 气体的粘度随温度升高而增大, 因为气体的粘性是由于动量传递所致(如第一节所描述), 当温度升高时, 分子的热运动加剧, 动量增大, 流层间的内摩擦加剧, 所以粘度增大。而液体的粘性来自分子引力, 温度升高, 分子间的距离加大, 分子引力减小, 内摩擦减弱, 所以粘度减小。

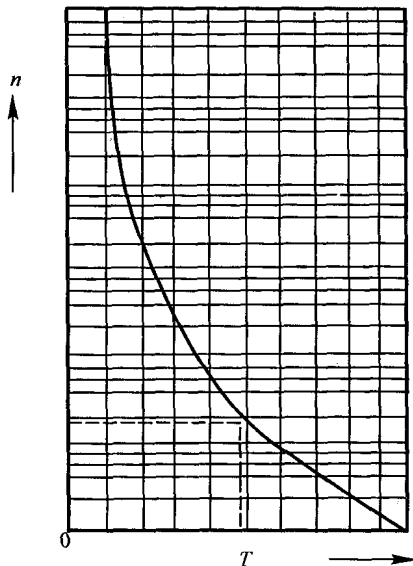


图 1-5

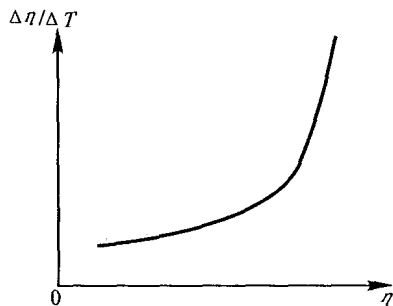


图 1-6