

王松岭 主编

流体力学



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

流体力学

王松岭 主编

吴本元 傅松 吕玉坤 参编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

全书共十三章,内容包括:流体的基本物理性质、流体静力学、流体运动学基础、流体动力学基本方程、黏性流体的管内流动与管路计算、流体的旋涡运动、不可压缩流体平面势流、不可压缩流体二维边界层、紊流射流、机翼和叶栅工作原理、气体动力学基础、相似原理与量纲分析、两相流体力学。各章均有一定数量的例题和习题。

本书为高等学校能源动力类专业本科教材,也可作为相关工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/王松岭主编. —北京:中国电力出版社,
2004

ISBN 7-5083-2010-7

I. 流… II. 王… III. 流体力学 IV. 035

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 015014 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2004 年 11 月第一版 2004 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 20 印张 492 千字

印数 0001—5000 册 定价 31.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



前 言

本书是根据高等学校热能动力工程专业本科人才培养目标，在 1996 年出版的《工程流体力学》基础上修订而成的。

这次修订，对原教材的内容和体系都做了一些必要的调整。主要的调整有：将紊流射流内容单独成章，增加了工程中的几种特殊射流和旋转射流；将气体的一维高速流动和二维超声速流动合并为一章，增加了等截面摩擦管流和换热管流；增加了两相流体力学的基本知识，即气固两相流动和气（汽）液两相流动。内容方面：在介绍完流体系统和控制体的概念之后增加了控制体的分析方法——输运方程；在流体动力学基本方程介绍中，增加了相对运动的伯努利方程和能量守恒方程；在平面势流的介绍中，增加了平面流场的复变函数方法，但只是简单介绍了奇点法。同时也精简了一部分内容。

在修订过程中，力求突出概念，加强基础理论，注重研究方法，并适当考虑了专业需要和特色。对书中加“*”号的内容，可根据学时多少进行取舍。

全书共分十三章，第一、二章由吕玉坤编写，第三、五、十二章由吴本元编写，第四、六、十一章由傅松编写，第七~十章、第十三章和前言由王松岭编写。王松岭担任主编，安连锁担任主审。

限于编者水平，教材中的缺点和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2003 年 4 月 10 日

目 录

前言

第一章 流体的基本物理性质 1

第一节 流体的概念	1	第五节 液体的表面张力和毛细现象	10
第二节 流体的密度	2	习题	12
第三节 流体的压缩性和膨胀性	3		
第四节 流体的黏性	5		

第二章 流体静力学 13

第一节 作用在流体上的力	13	第六节 液体的相对平衡	22
第二节 流体静压强及其特性	14	第七节 静止液体作用在固体壁面上的总压力	24
第三节 流体平衡微分方程	15	习题	29
第四节 流体静力学基本方程	17		
第五节 压强的计量	20		

第三章 流体运动学基础 31

第一节 研究流体运动的方法	31	第五节 控制体分析方法——输运方程	46
第二节 流体运动的几个基本概念	35	第六节 流体运动的连续性方程	48
第三节 流体微团运动分析	39	习题	52
第四节 流体运动的分类	44		

第四章 流体动力学基本方程 54

第一节 黏性流体中的应力	54	第五节 黏性流体总流的伯努利方程	68
第二节 黏性流体运动微分方程	57	第六节 伯努利方程的应用	72
第三节 理想流体运动微分方程	62	第七节 动量方程	77
第四节 理想流体运动微分方程的积分与伯努利方程	64	第八节 动量矩方程	80

第九节	相对运动的伯努利方程	83	习题	87
第十节	能量守恒方程	84		

第五章 黏性流体的管内流动与管路计算 91

第一节	黏性流体的层流与紊流 状态	91	第六节	非圆截面管路沿程损失的 计算	112
第二节	管内流动能量损失的类型 ..	94	第七节	管路中的局部损失	113
第三节	圆管中的层流流动	95	第八节	管路水力计算	120
第四节	黏性流体的紊流流动	98	第九节	管道水击现象	133
第五节	沿程损失系数的实验 研究	107	习题		139

第六章 流体的旋涡运动 142

第一节	旋涡运动的几个基本 概念	142	第三节	涡管强度守恒定理	147
第二节	斯托克斯定理	145	第四节	旋涡的保持性定理	149
			习题		153

第七章 不可压缩流体平面势流 155

第一节	有势流动的速度势函数	155	第五节	绕圆柱体有环量的流动	171
第二节	流函数	157	* 第六节	复位势和复速度	174
第三节	几种简单的势流流动	161	习题		181
第四节	平面势流的叠加流动	168			

第八章 不可压缩流体二维边界层 183

第一节	边界层的基本概念	183	第六节	平板紊流边界层近似计算	196
第二节	不可压缩流体层流边界层 方程	186	第七节	平板混合边界层近似计算	200
第三节	边界层动量积分方程	189	第八节	边界层分离现象	201
* 第四节	边界层的位移厚度和动量 损失厚度	191	第九节	绕流阻力与阻力系数	203
第五节	平板层流边界层近似计算	194	* 第十节	卡门涡街	208
			习题		210

第九章 紊流射流	212
第一节 自由淹没射流的形成及特征	212
第二节 圆断面射流和平面射流运动分析	214
第三节 工程中常见的几种射流	218
第四节 旋转射流	222
习题	225
第十章 机翼和叶栅工作原理	227
第一节 机翼的几何特性	227
第二节 翼型升力原理	228
第三节 翼型的气动特性	230
第四节 叶栅的几何参数	231
第五节 叶栅工作原理	232
习题	235
第十一章 气体动力学基础	237
第一节 微弱扰动波的传播	237
第二节 气体一维定常流动	241
第三节 准一维定常等熵变截面管流	247
第四节 一维流动中的正激波	253
第五节 超声速气流的小角折转流动	261
第六节 斜激波	264
第七节 缩放喷管的非设计工况流动	268
* 第八节 气体在等截面管中的流动	271
习题	279
第十二章 相似原理与量纲分析	282
第一节 流动相似的概念	282
第二节 相似原理	284
第三节 量纲分析与 π 定理	285
习题	289
第十三章 两相流体力学	290
第一节 颗粒的特性	290
第二节 气固两相流动的基本概念	295
第三节 气力输送基本原理	297
第四节 流化床的流体力学原理	301
* 第五节 气(汽)液两相混合物的管内流动	304
习题	312
参考文献	314

注：目录中 * 部分为选学内容。

流体的基本物理性质

第一节 流体的概念

一、流体的定义

在物质存在的三种形态（固体、液体和气体）中，液体和气体具有共同的特征——易流动性，故将液体和气体统称为流体。从力学角度讲，流体是一种受任何微小剪切力的作用都会连续变形的物体。只要这种力继续存在，变形就不会停止。固体则不然，当受到剪切力作用时，固体仅能产生一定程度的变形。

不论固体、液体和气体，它们都是由分子组成的，只是分子间的距离不同而已。固体物质因其分子间距离很小，分子间作用力很大，不易发生变形，而气体分子间的距离较大，分子间的作用力很小，气体分子可以自由运动，并总是充满它所能到达的整个空间。所以气体不能保持一定的形状和体积，极易发生变形和流动。液体介于两者之间，虽然和气体一样容易发生变形和流动，但在一般情况下，可以保持一定的体积，而不像气体那样总是充满整个容器。

如上所述，流动性是流体的基本特征。为表征流体的属性，通常用密度、压强、温度和速度等物理量来描述。

二、连续介质假设

从物质微观结构角度看，流体由分子组成，分子间有比其尺度大得多的间隙，同时，由于分子的随机运动，致使流体分子不连续地分布于其所占有的空间，并随时间不断地变化。

流体力学是一门宏观力学，研究的对象不直接是这些微观物质粒子本身，而是从这些物质抽象出来的一种模型即连续介质。连续介质模型认为（假设）物质连续地无间隙地分布于物质所占有的整个空间。在连续介质中，常常把较微观粒子结构尺度大得多而较宏观特征尺度小得多的流体微团称为质点。在微观上充分大而在宏观上充分小（相当于一个空间点）的质点包含足够多的分子，其统计平均特性能够反映流体的宏观特性，连续介质就是由在空间点上连续分布着的质点组成的。因此，流体宏观物理量也就是这些质点所在空间点及时间的连续函数，引入连续介质这一概念的目的也正在于此。

连续介质假设完全是在宏观意义下的概念，适用于所研究问题中的特征尺度比微观粒子结构尺度大得多的情况。在大多数流体力学问题中，这一条件能够满足。例如，一般工程问题中的特征尺度均大于 $1 \times 10^{-3} \text{ mm}$ ，在标准状况（ 0°C ， 101325 Pa ）下，若取 $1 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 作为流体质点的特征尺度，则 1 mm^3 中所包含的气体分子数约为 2.7×10^7 ，水分子数约为 3.4×10^{10} ，其统计平均特性足以满足连续介质假设的要求。但对于在高空大气中飞行的火箭等飞行器，由于

那里空气稀薄，其分子平均自由程较大，可能与火箭的尺寸具有相同的数量级，故那里的空气不能看成是连续介质。

第二节 流体的密度

一、流体的密度

单位体积的流体所具有的质量称为流体的密度。它表征的是流体在空间某点质量的密集程度。

对于均质流体，有

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1-1}$$

式中： ρ 为流体的密度， kg/m^3 ； m 为流体的质量， kg ； V 为流体的体积， m^3 。

对于非均质流体，欲求流体中某点的密度，可用围绕该点的微元体积 ΔV 去除微元体积内流体的质量 Δm ，当 ΔV 的值趋于 ϵ^3 时的极限，即为该点的密度。其中 ϵ 为流体质点的特征尺度，以满足流体作为连续介质的要求。

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow \epsilon^3} \frac{\Delta m}{\Delta V} \tag{1-2}$$

一般来说，流体的密度随压强和温度而变化。不过，液体密度随温度和压强的变化很小，通常情况下可近似视为常数。气体密度随压强和温度的变化较大。对于完全气体，可用气体的状态方程来表示密度和压强、温度之间的关系，即

$$p = \rho RT \tag{1-3}$$

式中： p 为气体的绝对压强， Pa ； ρ 为气体的密度， kg/m^3 ； R 为气体常数， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； T 为气体的热力学温度， K 。

表 1-1 列出了在标准大气压下几种常用流体的密度。表 1-2 为在标准大气压下，不同温度的水、空气和水银的密度。

表 1-1 几种常用流体的密度

流体名称	温度 (°C)	密度 (kg/m^3)	流体名称	温度 (°C)	密度 (kg/m^3)
纯水	4	1000	氧	0	1.429
海水	15	1020 ~ 1030	氮	0	1.251
普通汽油	15	700 ~ 750	氢	0	0.0899
石油	15	880 ~ 890	一氧化碳	0	1.250
酒精	15	790 ~ 800	二氧化碳	0	1.976
水银	0	13600	二氧化硫	0	2.927
空气	0	1.293	水蒸气	0	0.804

注 水蒸气的密度为便于计算而推算到 0°C。

表 1-2 不同温度下水、空气和水银的密度 kg/m^3

温度 (°C)	0	10	20	40	60	80	100
水	999.87	999.73	998.23	992.24	983.24	971.83	958.38
空气	1.293	1.247	1.205	1.128	1.060	1.000	0.9465
水银	13600	13570	13550	13500	13450	13400	13350

在流体力学中还用到流体的比体积这一概念。流体的比体积是其密度的倒数，即单位质量流体所占有的体积，以 ν (m^3/kg) 表示，即

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

此外，在一些工程问题中，还常常用到流体的相对密度（即流体的比重）这一概念。流体的相对密度指的是流体的密度与 4°C 水的密度的比值，通常用 d 表示，即

$$d = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (1-5)$$

式中： ρ_w 为 4°C 时水的密度， kg/m^3 。

显然流体的相对密度为一无量纲量。

二、混合气体的密度

混合气体的密度可按各种气体所占的体积百分数计算，计算式如下

$$\rho = \rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2 + \dots + \rho_n \alpha_n = \sum_{i=1}^n \rho_i \alpha_i \quad (1-6)$$

式中： ρ_i 为混合气体中各种气体的密度； α_i 为混合气体中各种气体所占体积百分数。

第三节 流体的压缩性和膨胀性

一、流体的压缩性

流体的体积随压强的增大而缩小的特性称为流体的压缩性。通常用体积压缩系数 β_p 来表示。它指的是在温度不变的情况下，增加单位压强所引起的流体体积的相对变化量，即

$$\beta_p = - \frac{dV/V}{dp} \quad (1-7)$$

式中： β_p 为体积压缩系数， $1/\text{Pa}$ ； dV/V 为流体的体积相对变化量； dp 为压强的增量。

流体体积压缩系数的倒数称为流体的体积弹性模量 E 。它指的是流体单位体积的相对变化量所需要的压强增量，即

$$E = \frac{1}{\beta_p} = - \frac{V dp}{dV} \quad (1-8)$$

E 的单位与压强的单位相同，工程上常用体积弹性模量衡量流体压缩性的大小。显然， E 值大的流体的压缩性小； E 值小的流体的压缩性大。流体的体积弹性模量 E 的值随温度和压强而变化，不过，液体的 E 值变化较小。

在一定温度下水的体积弹性模量与压强的关系列于表 1-3。由表中可见，水的 E 值很大，即它的压缩性很小，通常在工程计算中近似地取水的 E 值为 1.9613GPa 。

此外，由于流体在压缩过程中，其质量不变，即 $m = \rho V = \text{常数}$ ，微分可得

$$\rho dV + V d\rho = 0$$

故

$$\frac{dV}{V} = - \frac{d\rho}{\rho}$$

代入式 (1-7) 和式 (1-8)，可得 β_p 和 E 的另一表达形式

$$\beta_p = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-7a)$$

$$E = \frac{1}{\beta_p} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1-8a)$$

表 1-3

水的体积弹性模量 E

GPa

温度 (°C)	压强 (工程大气压 ^①)				
	5	10	20	40	80
0	1.85	1.86	1.88	1.91	1.94
5	1.89	1.91	1.93	1.97	2.03
10	1.91	1.93	1.97	2.01	2.08
15	1.93	1.96	1.99	2.05	2.13
20	1.94	1.98	2.02	2.08	2.17

① 工程上常用工程大气压 (kgf/cm²) 作为计量压强的单位, 1kgf/cm² = 98060Pa。

二、流体的膨胀性

流体的体积随温度的升高而增大的特性称为流体的膨胀性。通常用体积膨胀系数 β_T 来表示。它指的是在压强不变的情况下, 单位温升所引起流体体积的相对变化量, 即

$$\beta_T = \frac{dV/V}{dT} \quad (1-9)$$

式中: β_T 为体积膨胀系数, 1/K 或 1/°C; dV/V 为流体的体积相对变化量; dT 为温度的增量。

在一定压强作用下水的体积膨胀系数与温度的关系列于表 1-4。

表 1-4

水的体积膨胀系数 β_T

1/°C

压强 (工程大气压)	温 度 (°C)				
	1 ~ 10	10 ~ 20	40 ~ 50	60 ~ 70	90 ~ 100
1	14×10^{-6}	150×10^{-6}	422×10^{-6}	556×10^{-6}	719×10^{-6}
100	43×10^{-6}	165×10^{-6}	422×10^{-6}	548×10^{-6}	704×10^{-6}
200	72×10^{-6}	183×10^{-6}	426×10^{-6}	539×10^{-6}	
500	149×10^{-6}	236×10^{-6}	429×10^{-6}	523×10^{-6}	661×10^{-6}
900	229×10^{-6}	289×10^{-6}	437×10^{-6}	514×10^{-6}	621×10^{-6}

由表 1-4 可以看出, 当温度低于 50°C 时, 水的体积膨胀系数 β_T 随着压强的增加而增大; 当温度高于 50°C 时, β_T 却随着压强的增加而减小。

三、不可压缩流体

由上述可知, 流体的压缩性是流体的基本属性之一, 任何流体都是可以压缩的, 只是可压缩程度有所不同而已。例如, 水的压缩性较小, 通常每增加 0.1MPa, 其体积变化率不到 1/10000。其他液体的压缩性一般也比较小。气体的压缩性比较大, 像等温过程中, 完全气体的体积同绝对压强成反比, 压强增大一倍, 体积要缩小一半。

在工程实际中, 一般把液体视为不可压缩流体, 而忽略体积的微小变化, 将液体密度视为常数, 这样可使工程计算大为简化。但是, 在水击现象和水中爆炸等类问题中, 则不能忽略液体的压缩性, 必须按可压缩流体来处理。对于气体来说, 尽管其本身的压缩性较大, 但在某些情况下, 由于其密度变化不大, 若忽略密度的变化, 不会对所处理的问题产生较大

的误差，则可忽略流体的压缩性，而将气体看成不可压缩流体，同样可使问题的处理大为简化。例如，在标准状态下，当空气流速约在 70m/s 以下时，其密度变化不超过 2% ，此时忽略其变化所引起的误差不大，这在一般工程问题中是允许的。通常动力工程中的空气、烟气管道中的流速均低于 30m/s ，故可以将其按不可压缩流体来处理。而对于气体的高速流动，由于密度变化较大，必须考虑气体的压缩性。

第四节 流体的黏性

黏性是流体的重要属性。黏性与流体的运动规律密切相关，它是流体运动中产生阻力和能量损失的原因。

一、牛顿内摩擦定律

实验证明，当流体微团间发生相对运动时，会产生切向阻力，即摩擦阻力。为证明摩擦阻力的存在，现介绍以下实验。

设有两块平行平板，它们之间的距离为 h ，其间充满流体，下板固定不动，上板以速度 u 匀速沿 x 轴方向运动，如图 1-1 所示。由于黏性，流体会黏附于它所接触的固体表面，所以与上板接触的流体将以速度 u 运动，而与下板接触的流体静止不动，两板之间的流体作平行于平板的运动，其速度的大小由下板的零均匀地过渡到上板的 u ，呈直线分布规律。这样，运动较快的上层流体将带动运动较慢的下层流体向前运动；而下层流体将阻滞上层流体的运动，相互间便产生大小相等，方向相反的切向力，通常称为摩擦阻力，以 F 表示。

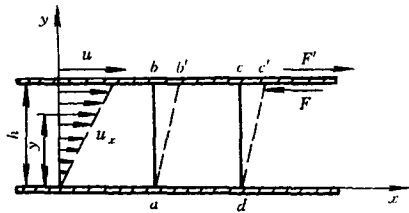


图 1-1 黏性流体内摩擦实验

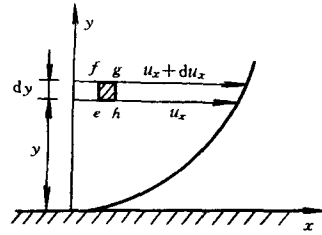


图 1-2 黏性流体的速度分布

实验证明，流体内摩擦阻力的大小与速度 u 成正比，与接触面积 A 成正比，而与两板间的距离 h 成反比，其数学表达式为

$$F = \mu A \frac{u}{h} \quad (1-10)$$

式中： μ 为流体的动力黏度，简称黏度，它与流体的种类以及流体的压强、温度有关，在一定的压强和温度下为一常数， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

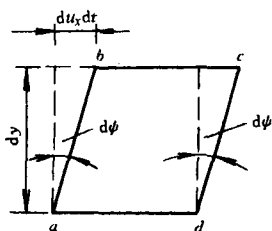
单位面积上的摩擦阻力称为摩擦应力，亦称切向应力，以 τ 表示

$$\tau = \mu \frac{u}{h} \quad (1-11)$$

在一般情况下，黏性流体的运动速度并不一定按直线规律变化，更常见的情况是按曲线变化，如图 1-2 所示。现取一无限薄流体层进行研究。坐标为 y 处的流速为 u_x ，坐标为 y

+dy 处的流速为 $u_x + du_x$ 。比值 $\frac{du_x}{dy}$ 为 y 方向的速度梯度。将上述切向应力公式推广到流体层, 便可得到

$$\tau = \mu \frac{du_x}{dy} \quad (1-12)$$



该式称为牛顿内摩擦定律。它表示作用在流体层间的切向应力的大小与速度梯度成正比, 其比例系数为流体的动力黏度。同样的流体, 速度梯度大时, 切向应力大; 速度梯度小时, 切向应力小。没有速度梯度, 切向应力为零。流体处于静止状态或以相同的速度运动时, 切向应力为零, 或者说流体的黏性作用没有显现出来。

速度梯度表示流动速度在其法线方向的变化率, 也表示流体微团的角变形速度。为了证明这一点, 在运动流体中取一矩形微元平面, 如图 1-3 所示。因上层与下层流速不同, 经过 dt 时间后, 矩形微元平面发生角变形, 变形角为 $d\psi$, 角变形速度则为 $d\psi/dt$ 。根据几何关系, 求得

$$\frac{d\psi}{dt} \approx \frac{du_x dt/dy}{dt} = \frac{du_x}{dy}$$

这就证明了速度梯度也可理解为流体的角变形速度。

二、动力黏度与运动黏度

在研究流体运动时, 不仅要用到动力黏度 μ , 而且还常用到 μ 与流体密度 ρ 的比值, 称为运动黏度, 用 ν (m^2/s) 表示, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-13)$$

流体的动力黏度 μ 和运动黏度 ν 的大小与流体的种类及温度、压强有关。

普通的压强对流体的黏度影响很小, 一般可忽略不计, 而只考虑温度的影响。液体的黏度随温度的升高而减小, 而气体的黏度则随温度的升高而增大, 这是由于两种流体的黏性机理不同的缘故。对于液体, 构成黏性的主要因素取决于分子之间的吸引力, 温度升高, 吸引力减小, 因而黏度下降; 而对于气体, 由于分子之间的距离较大, 分子之间的吸引力很小, 其构成黏性的主要因素取决于流体分子作混乱运动在不同流速层间所进行的动量交换。温度越高, 气体分子运动越剧烈, 动量交换越频繁, 故气体黏度也就越大。

在高压作用下, 气体和液体的黏度均将随压强的升高而增大。如水在 10^5 个工程大气压作用下的黏度可以增大到其在一个工程大气压作用下黏度的两倍。

水的动力黏度与温度的关系, 可以近似地用下述经验公式计算

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-14)$$

式中: μ_0 为水在 0°C 时的动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; t 为水的温度, $^\circ\text{C}$ 。

气体的动力黏度与温度的关系, 可以近似地用下述经验公式计算

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1-15)$$

式中: μ_0 为气体在 0°C 时的动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; T 为气体温度, K ; C 为依气体种类而定的常

数。

式 (1-15) 只适用于压强不太高 (例如 $p \leq 10$ 个工程大气压) 的场合, 这时可视气体的黏度与压强无关。水蒸气的动力黏度随温度和压强而变, 压强稍高, 上式便不能适用。

常用气体在标准状态下的黏度、分子量和常数 C 列于表 1-5。在标准大气压下水和空气的黏度随温度的变化列于表 1-6 和表 1-7。某些常用气体和液体的黏度随温度的变化曲线参如图 1-4 和图 1-5 所示。

表 1-5 常用气体的黏度、分子量和常数 C

流体名称	$\mu_0 (\times 10^{-6} \text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu_0 (\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$	M	C	流体名称	$\mu_0 (\times 10^{-6} \text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu_0 (\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$	M	C
空气	17.09	13.20	28.96	111	一氧化碳	16.80	13.50	28.01	100
氧	19.20	13.40	32.00	125	二氧化碳	13.80	6.98	44.01	254
氮	16.60	13.30	28.02	104	二氧化硫	11.60	3.97	64.06	306
氢	8.40	93.50	2.016	71	水蒸气	8.93	11.12	18.01	961

注 为便于计算水蒸气参数推算至 0℃ 时的。

表 1-6 水的黏度与温度的关系

温度 (℃)	$\mu_0 (\times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu_0 (\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$	温度 (℃)	$\mu_0 (\times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu_0 (\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$
0	1.792	1.792	40	0.656	0.661
5	1.519	1.519	45	0.599	0.605
10	1.308	1.308	50	0.549	0.556
15	1.140	1.141	60	0.469	0.477
20	1.005	1.007	70	0.406	0.415
25	0.894	0.897	80	0.357	0.367
30	0.801	0.804	90	0.317	0.328
35	0.723	0.727	100	0.284	0.296

混合气体的动力黏度可用下式计算

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i M_i^{\frac{1}{2}} \mu_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i M_i^{\frac{1}{2}}} \quad (1-16)$$

式中: α_i 为混合气体中 i 组分气体所占的体积百分数; M_i 为混合气体中 i 组分气体的分子量; μ_i 为混合气体中 i 组分气体的动力黏度。

表 1-7 空气的黏度与温度的关系

温度 (℃)	$\mu_0 (\times 10^{-6} \text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu_0 (\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$	温度 (℃)	$\mu_0 (\times 10^{-6} \text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu_0 (\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$
0	17.09	13.20	260	28.06	42.40
20	18.08	15.00	280	28.77	45.10
40	19.04	16.90	300	29.46	48.10
60	19.97	18.80	320	30.14	50.70
80	20.88	20.90	340	30.80	53.50
100	21.75	23.00	360	31.46	56.50
120	22.60	25.20	380	32.12	59.50
140	23.44	27.40	400	32.77	62.50
160	24.25	29.80	420	33.40	65.60
180	25.05	32.20	440	34.02	68.80
200	25.82	34.60	460	34.63	72.00
220	26.58	37.10	480	35.23	75.20
240	27.33	39.70	500	35.83	78.50

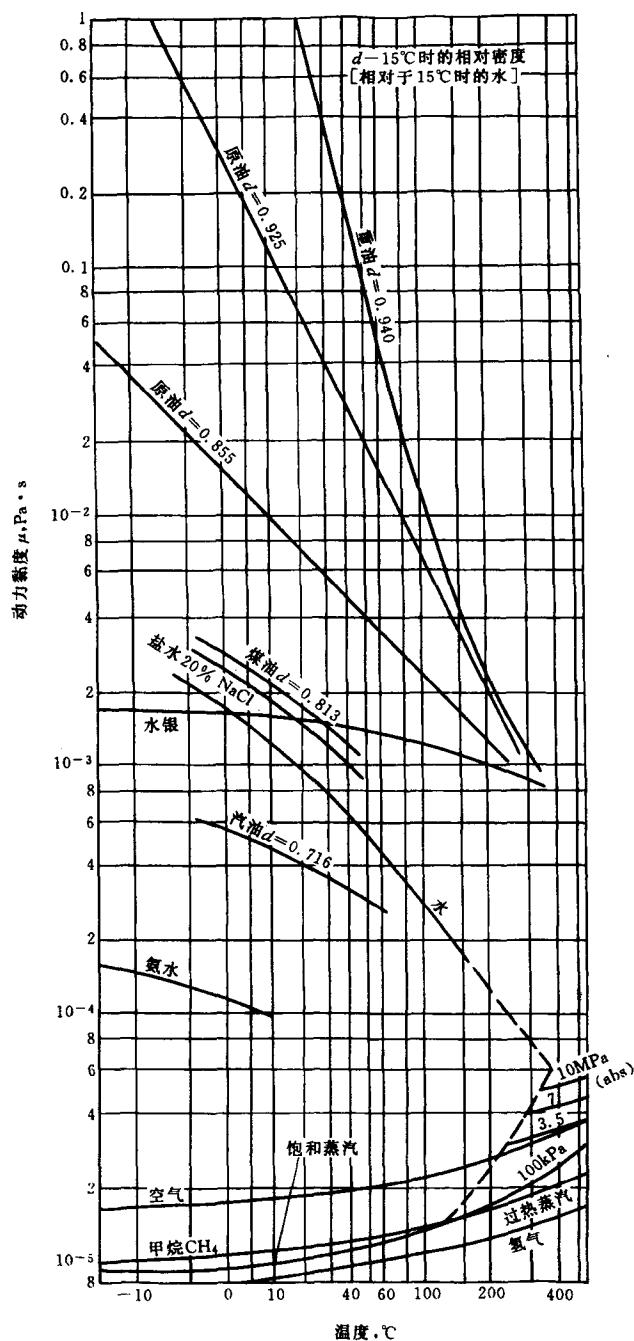


图 1-4 流体的动力黏度

三、牛顿流体与非牛顿流体

凡作用在流体上的切向应力与它所引起的角变形速度（速度梯度）之间的关系符合牛顿内摩擦定律的流体，称为牛顿流体，如图 1-6 中的 A 线所示。否则，称为非牛顿流体。非

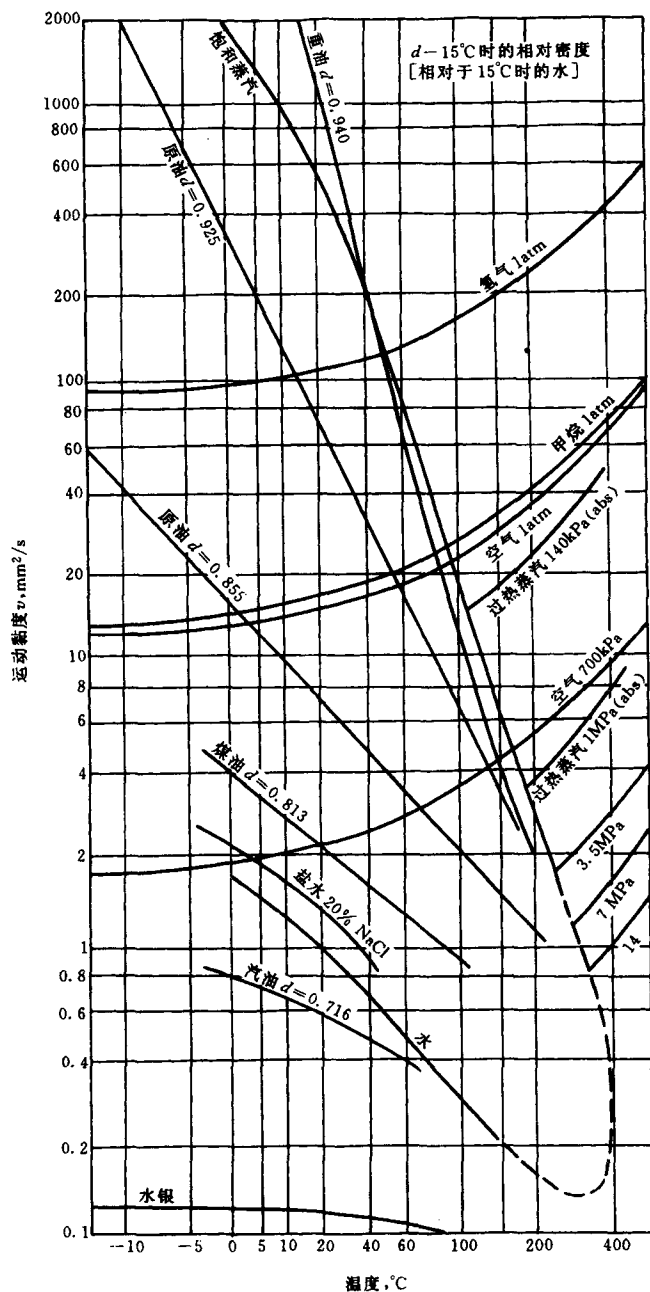


图 1-5 流体的运动黏度

牛顿流体分为几种类型。图 1-6 的 *B* 线代表理想塑性体，在产生连续变形前有一屈服应力 τ_0 ，应力大于屈服应力后，应力与角变形速度存在线性关系。牙膏的变形便有这种类似的性质。曲线 *C* 代表拟塑性体，它的黏度随角变形速度的增长而降低，黏土浆和纸浆都属于这类流体。曲线 *D* 代表胀流型流体，它的黏度随角变形速度的增长而增大。此外，还有具有触变现象的胶状液体，静止时很黏稠，甚至像凝固一样，但其黏度随角变形速度的增长而降

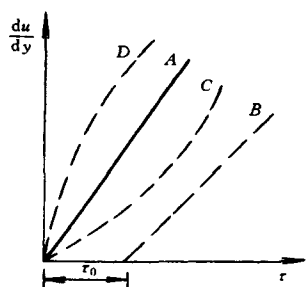


图 1-6 牛顿流体
和非牛顿流体

低，例如油漆和油墨。图中纵坐标代表理想流体，横坐标代表弹性固体。

如上所述，牛顿内摩擦定律只适用于牛顿流体，而不适用于非牛顿流体。本书只讨论牛顿流体。非牛顿流体是流变学的研究对象，非牛顿流体的研究对化工、食品等工业部门是很重要的。

四、黏性流体和理论流体假设

实际流体都具有黏性，都是黏性流体。不具有黏性的流体称为理想流体，这是客观世界中并不存在的一种假想的流体。

在静止流体中或做匀速直线运动的流体中，由于黏性作用表现不出来，完全可以把实际流体作为理想流体来处理。引入理想流体的假设，其意义还不止于此，在许多场合，想求得黏性流体流动的精确解是很困难的，在工程实际中，对某些黏性不起主要作用的问题，先不计黏性的影响，而按理想流体处理，可使问题的分析大为简化，从而有利于掌握流体流动的基本规律。至于黏性的影响，则可根据试验结果进行必要的修正。此外，即使是对黏性占主要地位的实际流体的流动问题，也可用上述方法，由研究不计黏性的理想流体入手，再研究更复杂的黏性流体的流动情况。

第五节 液体的表面张力和毛细现象

一、表面张力

液体的表面张力是液体表面上相邻部分之间的相互牵引力，其方向与液面相切，并与两相邻部分的分界线垂直。在表面张力的作用下，液体表面总是处于收缩的倾向，就像拉紧了弹性膜。表面张力是液体分子力在液体表面层中的一种宏观表现，液面上的分子受液体内部分子吸引力的作用，吸引力的方向与液面垂直并指向内部。在这种力的作用下，液体表面层中的分子有尽量挤入液体内部的趋势，因而液体表面趋向收缩成最小面积。例如，空气中的小液滴往往呈球状体。

表面张力的大小以作用在单位长度上的力，即表面张力系数 σ 来表示，它的单位是 N/m 。 σ 的大小与液体的性质、纯度、温度和与其接触的介质有关。表 1-8 列出了几种液体与空气接触的表面张力系数。

表 1-8

几种液体与空气接触时的表面张力系数

流体名称	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	表面张力系数 σ (N/m)	流体名称	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	表面张力系数 σ (N/m)
水	20	0.07275	四氯化碳	20	0.0257
水银	20	0.465	丙 酮	16.8	0.02344
酒精	20	0.0223	甘 油	20	0.065

二、毛细现象

液体分子间相互吸引、相互制约的这种吸引力称为内聚力。当液体与固体壁面接触时，液体分子和固体分子也有作用力，这种吸引力称为附着力。如果附着力大于内聚力时，就产生液体能润湿固体的现象，如图 1-7 (a) 所示；如果附着力小于内聚力，就产生液体不能