

高等学校教学用书

工程流体力学

北京钢铁学院 周亨达 主编

冶金工业出版社

高等学校教学用书

工程流体力学

北京钢铁学院 周亨达 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 16 1/4 字数 383 千字

1983年5月第一版 1986年2月第二次印刷

印数12,001~24,500册

统一书号: 15062·3984 定价2.70元

前 言

本教材是根据1977年冶金工业部高等院校教材会议制定的教学计划编写的。全书共分九章：第一章说明流体的一些基本概念，第二章至第四章说明流体平衡与机械运动的基本规律，第五章至第七章说明这些基本规律在有压管路、明渠、孔口及管嘴出流、堰流等方面的应用，第八章简略介绍流体流动的相似性与 π 定理，第九章说明泵与风机等流体机械的工作原理、性能与选择原则。这些内容既重视加强基本理论又考虑结合选矿专业的特点，同时也照顾到采矿、矿山机械、冶金机械及其它相近专业的要求。讲课学时在50~75的范围内，可酌情选用。记有星号的部分章节，是选学或参考的内容。

关于附面层理论及固体颗粒在流体中沉降和阻力的规律、水力运输、气力输送原理等多相流动的内容，在佟庆理副教授编的《两相流动理论基础》中，有所论述，选矿专业、采矿专业学生与重力选矿研究生，可以选学。

参加本书编写工作的同志有周亨达(第一、八、九章)、唐玉白(第二、三、四章)、佟庆理(第五章)、秦芳(第六、七章)。周亨达担任主编，负责全书的编纂整理工作。

编者限于水平，书中存在不少的缺点和错误，希望读者批评指正。

冶金工业部所属高等院校担任流体力学课程的部分教师，曾会聚一堂对本书初稿进行了审查，并提出了修改意见，在此表示谢意。

编 者

1981.12.北京

引 言

广阔的自然界存在着大量的流体物质。流体的平衡、运动及其与固体的相互作用，构成各种自然现象，直接影响着人类的生存。人们在长期的生产实践中，不断总结经验，探索并逐渐认识流体平衡、运动及其与固体相互作用的客观规律，且用之于生产实践，提高生产力，促进人类社会向前发展。在生产发展的同时，随之逐步形成一门技术科学——流体力学。

流体力学是应用力学的分支。工程流体力学则着重于探讨和研究流体平衡与宏观机械运动的基本规律，以及这些规律在工程中的实际应用。

冶金矿山和很多重要部门的生产、工作都是直接地或间接地应用流体力学的基本原理进行的。如重力选矿，矿井通风防尘与排水，水力采掘，矿粉的气力输送，固体的水力运输，生产、生活用水的供给，流量、流速、压强的测定，各种矿山机械、冶金机械设备的冷却、润滑及液压传动与控制，常用的流体机械，……等等，都是流体力学的基本原理在矿山工程和冶金工程中的应用。所以，矿冶科学工作者，应具备流体力学方面的基本知识；高等学校矿冶工程有关专业把工程流体力学作为必修课。

目 录

前言

引言

第一章 流体的基本概念	1
第一节 流体的特征 连续介质的概念	1
一、流体的特征	1
二、连续介质的概念	2
第二节 流体的主要物理性质	2
一、惯性	2
二、粘性	3
三、压缩性	9
四、表面张力	11
习 题	12
第二章 流体静力学	14
第一节 流体静压强及其特性	14
一、流体静压强	14
二、流体静压强的特性	14
第二节 流体的平衡微分方程及其积分	16
一、流体平衡微分方程	16
二、平衡微分方程的积分	17
三、帕斯卡定律	18
四、等压面	19
第三节 流体静力学基本方程	19
一、静止液体中的压强分布规律	19
二、静止液体中的压强计算	20
三、静止液体中的等压面	20
四、绝对压强、相对压强和真空度的概念	21
五、流体静力学基本方程的几何意义与能量意义	22
第四节 压强单位和测压仪表	22
一、压强单位	22
二、测压仪表	23
第五节 静止液体作用于平面壁上的总压力	27
一、总压力	27
二、总压力的作用点	28
第六节 静止液体作用于曲面壁上的总压力	30
*第七节 阿基米德原理和固体在液体中的浮沉问题	32
一、阿基米德原理——浮力定律	32

二、固体在液体中的浮沉问题	33
*第八节 等角速旋转容器中液体的相对平衡	35
一、等压面	35
二、压强分布规律	36
习题	37
第三章 流体动力学	40
第一节 研究流体运动的两种方法	40
第二节 迹线和流线	42
一、迹线	42
二、流线	42
第三节 定常流动和非定常流动	43
一、定常流动	43
二、非定常流动	44
第四节 用欧拉方法研究流体运动时的一些基本概念	44
第五节 连续性方程	46
一、直角坐标系中欧拉变数的连续性方程	46
二、微元流束和总流的连续性方程	48
第六节 无粘性流体的运动微分方程	50
第七节 无粘性流体运动微分方程的伯努利积分	52
第八节 质量力仅为重力时无粘性流体微元流束的伯努利方程	53
一、质量力仅为重力时的势函数 W	53
二、不可压缩、无粘性流体运动的伯努利方程	54
第九节 粘性流体的运动微分方程	54
一、粘性流体运动与其所受诸力之间的基本关系	55
二、粘性流体运动微分方程	56
第十节 粘性流体微元流束伯努利方程	57
第十一节 伯努利方程的能量意义和几何意义	59
一、伯努利方程的能量意义	59
二、伯努利方程的几何意义	59
三、水力坡度	63
第十二节 粘性流体总流伯努利方程	63
一、急变流和缓变流	63
*二、动量校正系数和动能校正系数	65
三、总流伯努利方程	66
四、总流伯努利方程的应用条件和注意事项	68
第十三节 测量流速和流量的仪表	71
一、毕托管	71
二、汾丘里流量计	72
第十四节 定常流动总流的动量方程及其应用	75
一、动量方程	75
二、动量方程的应用	76

习 题	79
第四章 粘性流体运动及其阻力计算	83
第一节 流体运动与流动阻力的两种型式	83
一、过水断面上影响流动阻力的主要因素——水力半径	83
二、流体运动与流动阻力的两种型式	84
第二节 粘性流体的均匀流动	84
一、均匀流动基本方程	85
二、均匀流动中的水头损失及其与摩擦阻力的关系	85
第三节 流动状态实验——雷诺实验	86
一、流动状态实验——雷诺实验	86
二、流动状态与水头损失的关系	87
三、流动状态判别标准——雷诺数	88
第四节 流体在圆管中的层流运动	92
一、均匀流动中内摩擦力的分布规律	92
二、圆管层流中的速度分布规律	93
三、圆管层流中的平均速度和流量	93
四、圆管层流中的沿程损失	94
*五、层流起始段	95
*第五节 流体在平行平板间的层流运动	96
*第六节 偏心环形间隙及两倾斜平板之间的层流运动	101
一、偏心环形间隙中的层流运动	101
二、两倾斜平板间的层流运动	103
*第七节 环形平面间隙和其它形状流道中的层流流量计算	105
一、环形平面间隙的流量计算	105
二、其它形状流道的流量计算	106
第八节 流体在圆管中的紊流运动	107
一、运动要素脉动和时均化的概念	107
二、紊流运动中的摩擦阻力	110
三、紊流运动中的速度分布	111
四、紊流核心与层流边层	112
五、水力光滑管和水力粗糙管	112
六、圆管紊流中的水头损失	113
第九节 沿程阻力系数 λ 值的确定	114
第十节 非圆形截面均匀紊流的阻力计算	121
一、利用原有公式进行计算	121
二、用蔡西公式进行计算	121
第十一节 粘性流体的不均匀流动	122
一、管径突然扩大处的局部损失	122
二、其它类型的局部损失	123
习 题	132
第五章 有压管路的水力计算	135

第一节 简单管路的水力计算	135
第二节 串联管路	138
第三节 并联管路	139
第四节 连续均匀出流管路	141
*第五节 管网的水力计算基础	142
一、枝状管网的水力计算	143
二、环状管网的水力计算	145
*第六节 有压管路中的水锤	145
一、水锤现象的发展过程	146
二、水锤压强计算公式	147
三、水锤压强波传播速度	148
四、水锤的减弱	151
习 题	151
第六章 明渠定常均匀流	154
第一节 概 述	154
第二节 明渠定常均匀流的水力计算	155
一、基本计算公式	155
二、计算平均流速的经验公式	156
三、流速分布规律	159
第三节 水力最佳断面	163
一、水力最佳断面尺寸的确定	163
二、水力计算的基本类型	165
习 题	166
第七章 孔口、管嘴出流及堰流	167
第一节 孔口出流	167
一、薄壁圆形小孔口定常出流	167
二、定常水头大孔口自由出流与淹没出流	169
三、孔口非定常出流	170
第二节 管嘴出流	171
一、圆柱形外管嘴定常出流	172
二、其它形状的管嘴出流	175
第三节 堰 流	177
一、矩形薄壁堰自由出流	177
二、三角形薄壁堰自由出流	179
习 题	179
第八章 流体运动的动力相似, π 定理	181
第一节 流动的动力相似	181
一、相似概念	181
二、流体动力学中的一些相似准数	184
三、模拟实验	189
第二节 π 定理	190

一、量纲分析基础——量纲的和谐性	190
二、 π 定理	190
习 题	195
第九章 泵与风机	196
第一节 离心式泵	196
一、概述	196
二、泵的扬程	198
三、叶轮	201
四、在泵中的能量损失	208
五、泵的吸上扬程与汽蚀现象	210
六、离心式泵的性能曲线 比例定律	213
七、泵在管路中的工况点, 工况的调节	217
八、泵的并联运转与串联运转	218
九、离心式泵的比转数及型号	219
十、离心式杂质泵	221
十一、离心式泵的选择	222
第二节 离心式通风机	225
一、概述	225
二、通风机的风压、风量和效率	225
三、离心式风机的性能、工况、调节和并联及串联运转	227
四、离心式风机的比转数、无量纲系数与型号	227
五、离心式通风机的选择	229
第三节 轴流式风机	230
一、轴流式通风机的构造概要和工作原理	230
二、轴流式压气机	232
第四节 容积式泵与容积式风机	233
一、往复式泵	233
二、油隔离泥浆泵	234
三、活塞式压气机	235
四、罗茨泵与罗茨风机	236
第五节 水环式真空泵与压缩机	238
一、水环式真空泵及压缩机的工作原理与构造概要	238
二、水环式真空泵及压缩机的型号与性能	240
第六节 气泡泵	240
习 题	242
附录	243
I. 一些常用的有关量的常数值	244
II. 几个常用量的单位及其换算关系	248
III. 各章习题答案	249

第一章 流体的基本概念

第一节 流体的特征 连续介质的概念

一、流体的特征

“流体”可以用分子间的空隙与分子的活动来表述。在流体中，分子之间的空隙比在固体中的为大；分子运动的范围，也比在固体中的运动范围大。而且，分子的移动与转动为其主要的运动形式；在固体中，分子绕固定位置振动则是主要的。若对一种固体(如铁)进行加热，增加分子运动的能量，开始是少数分子(质点)有较大的振幅而迁移位置；继续加热，分子运动更加剧烈，相互的约束则逐渐减弱，更多的分子迁移位置；最后，所有的分子都迁移位置。这样原来有规则的结构被破坏，以熔解的方式表现出固体状态转化为流体状态。

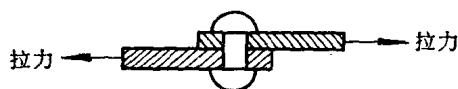


图 1-1 铆接金属板

固体与流体的差别何在？今设有两块金属板以铆钉连接，如图1-1。两个平行的拉力反向作用于金属板，一个金属板相对另一个有滑动的趋势，铆钉承受剪力。当拉力不大时，固体铆钉产生剪应力，保持静力平衡。但若不用金属铆钉，而在孔中充满流体，如油、水或空气，使其受剪力的作用，不管这个剪力是怎样小，这些流体都要产生相对运动。因此，可以说，流体是容易变形的物体，没有固定的形状。

在力学中，常根据应力理论来给流体下定义。认为一种物质在静力平衡时，不能承受切力或剪力，这种物质，就是流体。因而，依照应力作用的特点，可以将物体分为两种状态：固体与流体。

流体一般分为两类：液体与气体。

液体具有一定的体积，与盛装液体的容器大小无关，可以有自由面。分子间的空隙大约等于其分子的平均直径 d_0 。1立方厘米的水中约有 3.4×10^{22} 个分子。关于液体状态的理论，现在虽然尚不完善，但可以知道，液体中的每一个分子，常常是在其邻近分子的强凝聚力场中。液体的分子有些是分散的，有些却集合成群，形成队列，并周期性地分裂成较小的群。施于液体上的任何剪切力，都将引起其变形，只要剪切力仍在继续施用，则变形的量就继续增加。

气体则是要膨胀充满其所占的空间的。气体的显著特点是其分子间距大，并随之而表现出的是密度较低。在 0°C 及1标准大气压时，1立方厘米的气体，大约有 2.7×10^{19} 个分子。若把这些分子排列在立方格子中，它们将相互间隔 3.3×10^{-7} 厘米。分子的平均直径 d_0 约

为 3.5×10^{-8} 厘米，它们的平均间隔约为分子的平均直径的10倍，即比液体中的分子间隔为大。所以，在正常情况下，气体中的分子是相互远离的，只有微弱的凝聚力作用。在通常的时间内，每个分子以定速在直线上自由移动。经实验发现，自由移动的平均行程约为分子平均直径的200倍。

气体与蒸汽不同，其区别在于蒸汽（如水蒸汽和氨）容易凝结成液体，而气体则较难。

二、连续介质的概念

液体与气体都是由分子构成的，流体的性质及运动也都是与分子的状态密切相关的。但是在许多情况下，特别是许多工程实际问题所涉及的装置系统，其尺寸与流体分子距离及分子运动的自由行程相比，则是非常大的。此时不必要探讨流体个别分子的微观性质，而应该研究其大量分子的形态及平均统计的宏观性质。若不考虑个别分子，便可以把流体看成是由无数质点组成的连续介质（Continuous medium）。就是说，质点是组成流体的最小单位，质点与质点之间不存在空隙。包含在一个非常小的范围内的这种连续介质，其质量可以认为是均匀地分布在整个体积之中。用精密仪表对微量流体进行测量，就可显示出流体性质的改变是连续地、逐渐地进行的。它证实了流体连续性的假说。

在连续介质力学中，我们假定宏观流体的特性（如平均密度、平均压强与平均粘度）是随着所观察的流体微团的大小及其在系统中的位置与时间而连续变化的。若微团非常小，又符合连续性的条件，同时也看不出来这些特性的变化，这样的微团，称为流体的一个质点。表示流体平均特性的质点，假定是占据空间位置的一个点，则用流场的方法，可表示流体连续的特性。所以，流体的特性（如密度、压强及速度等）就可表示为空间与时间的连续函数。在此基础上建立方程，研究流体的平衡与运动。由于这些方程与质点分子结构性质无关，因而对于气体与液体可同样处理。

在工程流体力学中，不考虑流体内部的分子间隙与分子运动，仅从宏观的角度，研究流体质点因受外力作用而引起的机械运动，可使复杂的问题大大简化，从而有可能利用数学工具描述这些运动规律，以解决工程实际问题。这是提出连续介质概念的主要原因。本课程所提到的流体，概指连续介质。

但是，当研究冲波波前结构及稀薄气体流动的问题时，这种经典流体动力学的连续性近似，将不适用，应以统计力学和运动理论的微观近似来代替。不过，在干式磨矿吸入式气力输送管道中的空气，因其真空度不高，仍可按连续介质处理。至于流体的某些宏观特性（如粘性与表面张力等），还需要从微观分子运动的角度来说明其产生的原因，但不用来分析流体的机械运动。

第二节 流体的主要物理性质

决定流体运动状态变化的内因是流体的物理性质。流体的主要物理性质，有下述几种。

一、惯性

物体具有反抗外力作用而维持其固有的运动状态的性质，称为惯性。由于具有惯性，一切物体都反抗因外力而引起的运动状态的改变。物体包含的物质越多，它的惯性就越大。测度物体惯性的量，叫做这个物体的质量。在工程中，常常从流体的重量求出流体的

质量，以质量的多少，表示流体的惯性大小。根据牛顿运动第二定律，流体的重量等于流体的质量与重力加速度的乘积，即：

$$W = mg \quad (1-1)$$

式中 W ——流体的重量，牛；

m ——流体的质量，公斤；

g ——重力加速度，米/秒²。

流体所具有的质量，不因流体所在位置不同而变化。但重力加速度却因位置差异而有不同之值，在中纬度附近约为9.806米/秒²。质量相同的流体可能在不同的地方有不同的重量。所以重量与质量是两个相关而又不相同的概念，量纲不同，单位不同，不可相混。

工程中也常用体积表示流体的量的多少。为了便于比较，把单位体积的流体质量，称为流体的密度，即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

单位体积的流体重量，称为流体的重度 (Specific Weight)，即

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1-3)$$

上两式中 m ——流体的质量，公斤；

V ——流体的体积，米³；

W ——流体的重量，牛；

ρ ——流体的密度，公斤/米³；

γ ——流体的重度，牛/米³。

由式 (1-1)、(1-2) 与 (1-3) 可得

$$\gamma = g\rho \quad (1-4)$$

注意，重度不应与比重 (Specific gravity) 相混。比重是指物体质量与同体积的4°C蒸馏水的质量相比之值，为无量纲的纯数。

常用的一些流体密度、重度、比重值见附录表 1。

二、粘性

流体运动时，其内部质点沿接触面相对运动，产生内摩擦力以抗阻流体变形的性质，就是流体的粘性。

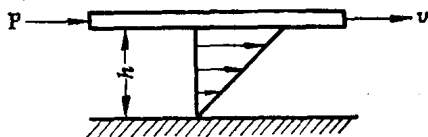


图 1-2 在平行平板间的流动

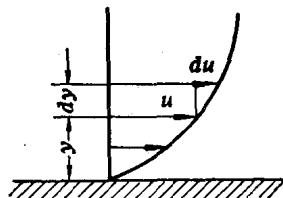


图 1-3 非线性速度分布

在平行平板间充满流体，如图1-2。上板以速度 v 运动，附着在此板上的薄层流体质点也以速度 v 随板运动。下板固定不动，附着于下板的薄层流体质点的速度为零。假定流体是分层运动，没有不规则的流体运动及脉动加入其中，则由下板到上板之间，有许多流体

层,其速度由零逐渐增加,最后一层的速度为 v ,上层流体流动较快,下层流动较慢,上面流体层中的质点与下面流体层中的质点在接触面上发生相对滑动。快层对慢层的作用力,与运动同方向,带动慢层加速。慢层对快层也有一作用力,与运动方向相反,阻滞快层的运动。这一对作用力,称为流体的内摩擦力。这种内摩擦力阻止两相邻的流体层做相对运动,从而表现为阻止流体的变形。为了使上板能以速度 v 运动,克服流体层相互间的内摩擦力,维持两板间流体的流动,施于上板的力设为 P ,流体层间接触面上的内摩擦力设为 T ,则 $P=T$ 。平板与流体相接触的面积设为 A ,则内摩擦切应力 $\tau = \frac{T}{A}$ 。

设在流体中的速度为线性分布如图1-2所示,流体的切应变率(即单位时间的角变形)为 v/h 。根据实验知道:流体的内摩擦切应力与切应变率成正比例。比例系数就是表征流体特点的粘性系数,即

$$\tau = \mu \frac{v}{h} \quad (1-5)$$

式中 τ ——流体内摩擦切应力;

v ——上板移动的速度;

h ——两平行板间的垂直距离;

μ ——比例系数,一般称为动力粘性系数。

流体中的速度 u ,若为非线性分布,如图1-3所示,则流体中的切应力是逐点变化的。所以

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

式中 $\frac{du}{dy}$ ——切应变率或速度梯度。

若距离 y 增加(或减少)而速度 u 却减少(或增加),则 $\frac{du}{dy}$ 之前应冠以负号。

式(1-6)是牛顿提出的,称为牛顿内摩擦定律或粘性定律。这个定律表明了流体作层状运动时,其内摩擦力的变化规律。运动中,其内摩擦力按这个规律变化的流体,称为牛顿流体。否则,为非牛顿流体(Non-Newtonian fluid)。

动力粘性系数 μ ,是反映流体粘性的一个物理量,随不同的流体而有不同之值,由实验测定。其单位可由式(1-6)的量纲决定。设质量、长度、时间等基本量纲,分别以 M 、 L 、 T 表示,动力粘性系数 μ 的量纲为 $ML^{-1}T^{-1}$ 。在物理学中,质量的单位为克,长度与时间的单位分别为厘米与秒。动力粘性系数 μ 的物理单位是克/秒·厘米。或以“泊”(Poise)表示。但实际应用时,常以力(达因)代换质量(克),所以

$$1 \text{泊} = 1 \text{克/秒} \cdot \text{厘米} = 1 \text{达因} \cdot \text{秒/厘米}^2$$

泊的百分之一称为厘泊,也是常用的单位。

在工程单位中,动力粘性系数 μ 的单位为公斤力·秒/米²。

在国际单位(SI)制中,动力粘性系数 μ 的单位为牛·秒/米²或帕·秒。

它们的换算关系为:

$$1 \text{公斤/秒} \cdot \text{米} = 10 \text{泊}$$

$$1 \text{ 牛} \cdot \text{秒} / \text{米}^2 = 10 \text{ 达因} \cdot \text{秒} / \text{厘米}^2 = 10 \text{ 泊} = 0.102 \text{ 公斤力} \cdot \text{秒} / \text{米}^2$$

流体的动力粘性系数 μ 与其密度 ρ 之比, 称为流体的运动粘性系数, 以 ν 表之。即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-7)$$

由上式可知, 运动粘性系数 ν 的量纲为 $L^2 T^{-1}$ 。它的物理单位为厘米²/秒, 称为“斯”(Stoke)。斯的百分之一为厘斯。在SI制中; 它的单位为米²/秒。其换算关系为:

$$1 \text{ 米}^2 / \text{秒} = 10000 \text{ 厘米}^2 / \text{秒} = 10000 \text{ 斯}$$

动力粘性系数或称动力粘度, 能反映流体粘性的大小, 故常称为绝对粘度。运动粘性系数也称运动粘度。

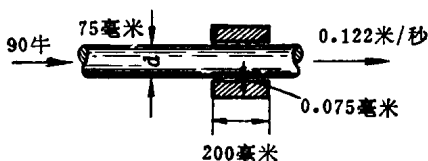


图 1-4 轴与轴套

例 1-1 轴置于轴套中, 如图1-4。以90牛的力, 从左端推轴向右移动。轴移动的速度为0.122米/秒, 轴的直径为75毫米, 其它尺寸见图中。求轴与轴套间流体的动力粘性系数 μ 。

解 设轴与轴套间流体的速度按线性规律分布, 则由式 (1-5) 得

$$\mu = \frac{\tau h}{v}$$

但

$$\tau = \frac{T}{A} \quad \text{且 } T = P, \quad A = \pi d l$$

故

$$\mu = \frac{T h}{A v} = \frac{P h}{\pi d l v} = \frac{90 \times 0.000075}{3.1416 \times 0.075 \times 0.2 \times 0.122} = 1.174 \text{ 帕} \cdot \text{秒}$$

例 1-2 一种液体的动力粘度为0.05泊, 比重为0.85。试用SI制表示它的动力粘度与运动粘度。

解 动力粘度 $\mu = 0.05 \text{ 泊} = 0.05 \frac{\text{克}}{\text{厘米} \cdot \text{秒}} \times \frac{1 \text{ 公斤}}{1000 \text{ 克}} \times \frac{100 \text{ 厘米}}{1 \text{ 米}} = 0.005 \text{ 公斤} / \text{米} \cdot \text{秒}$

$$\begin{aligned} \mu &= 0.05 \text{ 泊} = 0.05 \frac{\text{达因} \cdot \text{秒}}{\text{厘米}^2} \times \frac{1 \text{ 牛}}{100000 \text{ 达因}} \times \frac{10000 \text{ 厘米}^2}{1 \text{ 米}^2} \\ &= 0.005 \frac{\text{牛} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2} = 0.005 \text{ 帕} \cdot \text{秒} \end{aligned}$$

$$\text{运动粘度 } \nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0.005 \text{ 公斤} / \text{米} \cdot \text{秒}}{0.85 \times 1000 \text{ 公斤} / \text{米}^3} = 5.88 \times 10^{-6} \text{ 米}^2 / \text{秒}$$

压强与温度的变化, 都将引起流体粘性的改变。但压强的影响较小, 在一般情况下, 可忽略不计, 仅考虑温度对粘性的影响。

水的运动粘性系数 ν 与温度 t 的关系, 可由下面的经验公式表示

$$\nu = \frac{0.0178}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \text{ 斯} \quad (1-8)$$

式中 t —— 水的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

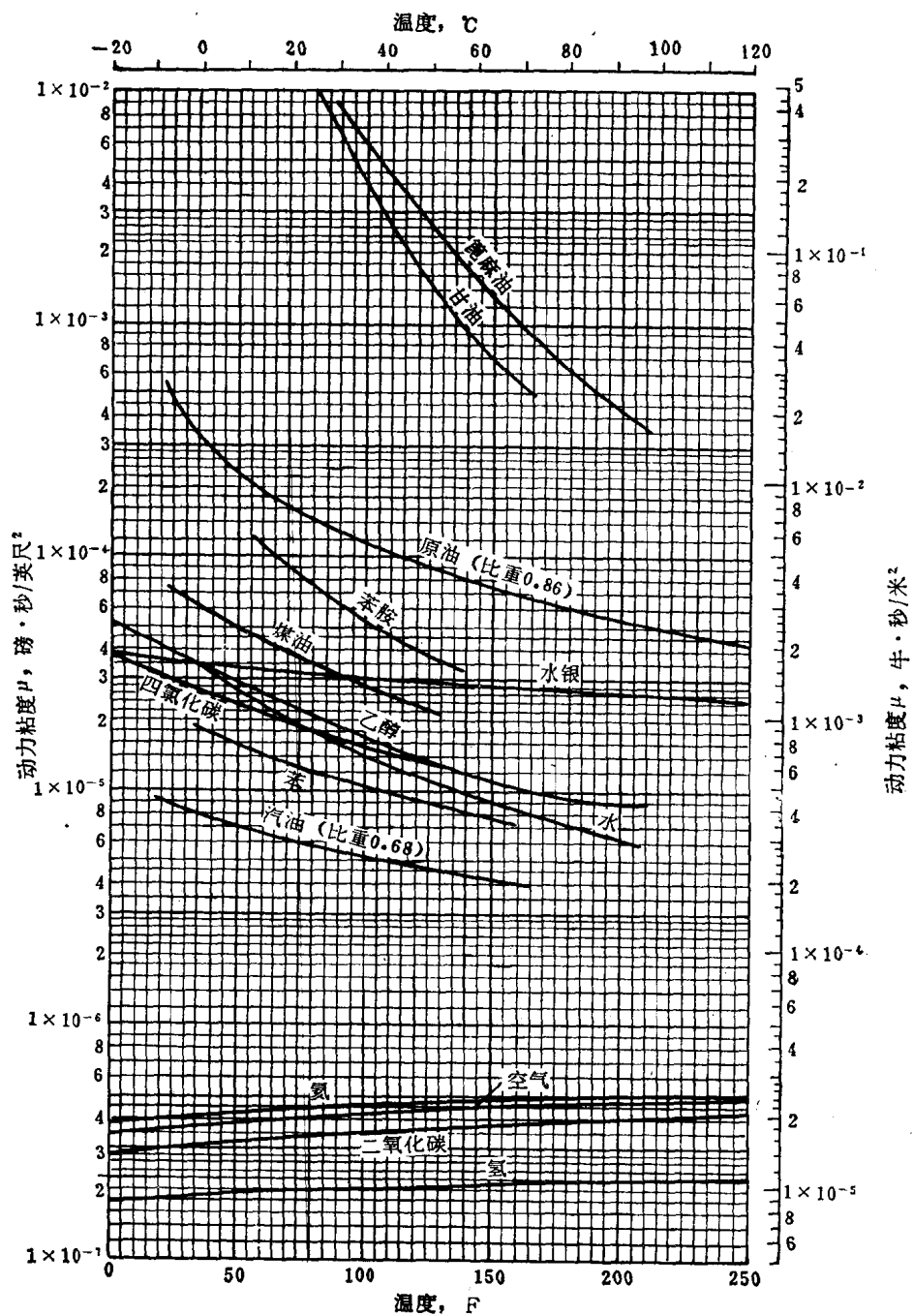


图 1-5 几种液体与气体的动力粘度

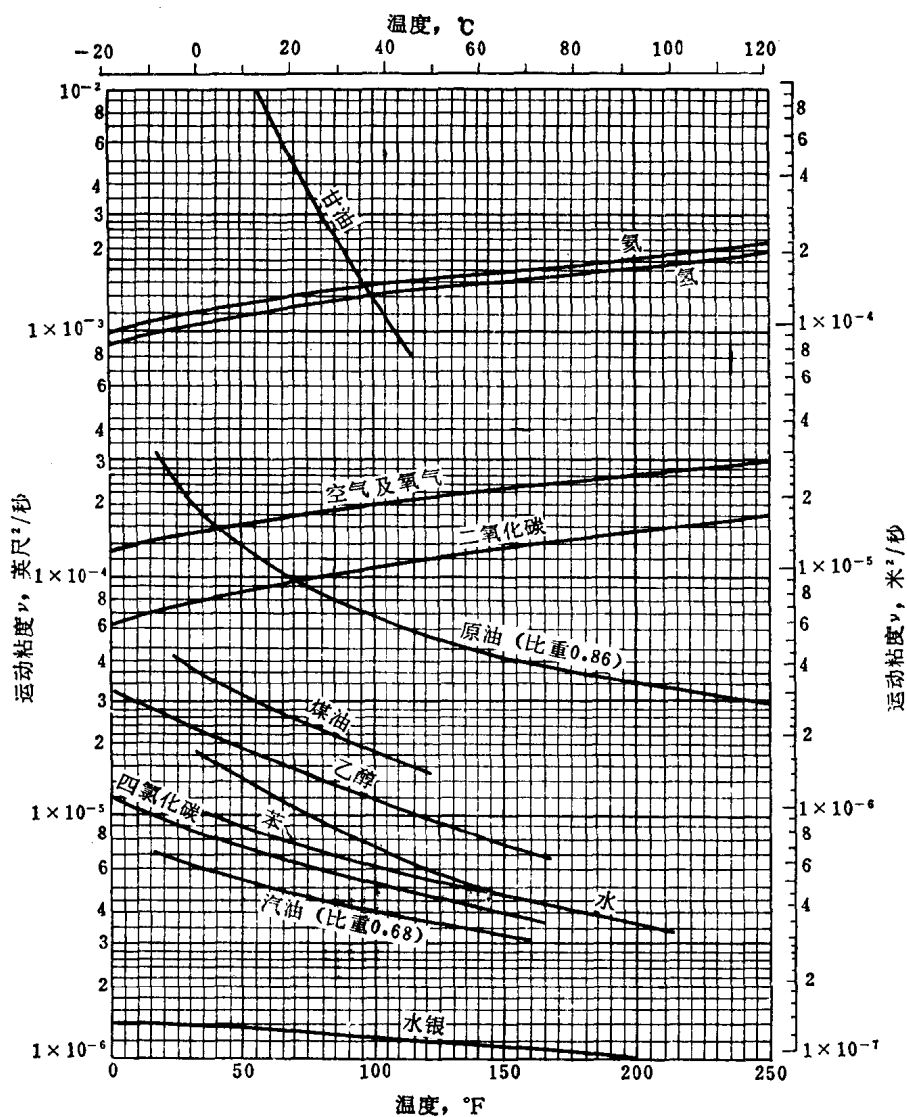


图 1-6 几种液体与气体的运动粘度

气体的粘性常以动力粘度 μ 表示。它与温度的关系，可由下式确定

$$\mu = \mu_0 \frac{1 + \frac{C}{273} \sqrt{T}}{1 + \frac{C}{T}} \quad (1-9)$$

式中 μ_0 ——气体 0°C 时的动力粘度；

T ——气体的绝对温度， $T = 273 + t^\circ\text{C}$ ，K；

C ——常数，几种气体的 C 值，见表 1-1。

几种液体与气体的动力粘度 μ 随温度而变化的曲线，表示于图 1-5 中；其运动粘度随温度而变化的曲线，表示于图 1-6 中。

从图 1-6 可以看出：液体的运动粘性系数 ν 随温度升高而减小；气体的运动粘性系数

ν 则随温度的升高而增大。这是由于液体与气体具有不同分子运动状态的缘故。

表 1-1 几种气体的C值

气 体	空 气	氢	氧	氮	蒸 汽	二氧化碳	一氧化碳
C 值	122	83	110	102	961	260	100

在液体中，分子间距小，分子互相作用的力较强，这样，阻止了质点间相对滑动而产生内摩擦力，即表现为粘性。当液体的温度升高时，分子间距加大，引力减弱，因而粘性则降低；在气体中，分子间距大，引力弱，分子运动的自由行程大，分子间相互掺混，速度快的分子进入慢层中，速度慢的分子进入快层中，两相邻流体层间进行动量交换（动量扩散），从而阻止了质点间的相对滑动，呈现出粘性。而分子引力的作用，相比之下微乎其微，忽略不计。当气体的温度升高时，内能增加，分子运动更加剧烈，动量交换更大，阻止相对滑动的内摩擦力增加，所以粘度增大。

几种液体在不同温度下的动力粘性系数值见附录表 2。

几种气体在0°C与1大气压时的粘性系数值见附录表 3。

有一些物质（如焦油、火漆以及一些胶质）在某些情况下，看起来好象是固体状态，然而可以划为切应变率非常小的高粘度的流体。还有一些软的或塑性物质（如铅、肥皂、沟内污泥、粘土浆、融化的蜡烛等）可以流动，但只有在超过某种极小的应力之后才能流动。因此，按通常的定义，这样的一些塑性物质，不是真正的流体。图 1-7 中切应力对应于切应变率的曲线，就说明这种差别。对于流体，在图中是一条通过原点的直线，如图中的曲线 1，切应力与切应变率之比值，对于全部切应变率都是相同的，若流体的种类已定，其动力粘度，全由温度与压强决定，与切应变率无关；对于塑性体，在流动开始之前，需要有一个称为屈服点的极小应力，如图中的曲线 2。

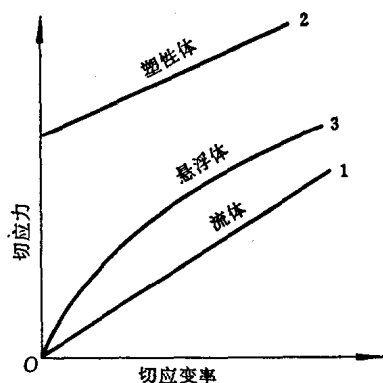


图 1-7 切应力与切应变率的关系

在许多工业生产过程中，人们常遇到的是一种流体与悬浮颗粒组成的混合物的运动。而确定这种悬浮体的摩擦损失，却是一个既重要又困难的问题。在悬浮体的流动特性方面，尚缺乏实验资料。按式 (1-6) 所表示的意义，实验证明，悬浮体的“粘性”比携带颗粒的流体的粘性要高很多。而且，悬浮体的“粘性”可以因切应变率的不同而有差异，如图中的曲线 3。这种非均质流体的粘性，可参阅有关文献。

流体具有粘性，在流动中将产生阻力。为了克服阻力，维持流体的流动，就需要供给流体能量。所以，流体的粘性在流体的运动过程中起着很重要的作用。

关于运动流体中两邻层间的内摩擦的机理和理论，现在尚未完全弄清楚。目前，对于气体的粘性的解释比对液体粘性的解释要充分些。

为了研究的方便，使问题简化，在某些场合，可不考虑流体的粘性。这种流体，称为