

工 程 流 体 力 学

(铸 造 专 业 用)

上 册

北方十六所高等院校
铸造专业教材联合编写组

一九七八年十二月

前 言

遵照毛主席关于“教育要革命”、“教材要彻底改革”的教导，北方十六院校铸造专业1977年3月在山东牟平会议上商定编写此教材。同年5月合肥会议制订出编写大纲，并作了编写分工。初稿印出后，经十六院校及有关工厂、科研和设计单位代表于12月曲阜会议进行审查。

工程流体力学是一门技术基础课。必须在保持其基本内容和保持其科学系统性的基础上，密切联系我国实际，结合工程技术专业。在编写过程中我们注意了 this 原则。

本教材分上下两册出版。上册为教学讲授部分，共八章分为两篇。第一篇为流体力学理论基础；第二篇为泵与风机。下册为与铸造工艺设备专业有关的十个流体力学专题，供学生阅读及毕业设计参考。主要目的是应用理论对典型工程进行综合分析，巩固学生所学的基础知识，并使获得基础知识的综合运用，提高分析问题和解决问题的能力。

由于编者思想水平及业务水平有限，实践基础不够，教材中有不妥和错误之处，殷切地期望各院校的师生和读者批评指正。

本教材编写分工如下：第一、二、三、五章（合肥工业大学郑传宁）；第六章、第四、五、六专题（洛阳农机学院关光森）；第十专题（东北工学院李诗久）；第四、七、八章、第一、二、三、七、八、九专题（东北工学院刘五秀）。东北工学院最后总审定稿。

北方十六院校铸造专业教材联合编写组

1978年2月

绪 论

液体与气体（统称为流体）在工业生产中占有重要的地位。工程流体力学是从宏观方面来研究流体平衡与运动的规律以及这些规律在生产实践上的应用。或者说工程流体力学是研究液体与气体在静止与运动时的各种力学定律，以及这些定律在工程实践上的应用。流体与固体之间的相互作用力，是它研究的主要矛盾。工程流体力学是劳动人民在长期生产斗争中逐渐总结发展起来的。

在讲述流体力学一般规律的同时，密切结合铸造工程实际，并突出其对流体力学的一些特殊要求。

例如在铸造工艺方面，浇注系统的水力计算、抬箱力的确定，以及离心铸造的流体力学原理等；在合金熔炼方面，冲天炉的风量、风压及料柱、炉胆的阻力计算等；更为重要的是在砂处理方面，特别是从 1965 年我国工人阶级和工程技术人员，首创“水爆清砂”（即 65 清砂），并结合旧砂湿法再生和热气流烘干的气力送砂等流程，构成新的机械化生产线，它是改变铸造生产三高（高劳动强度、高温、高粉尘）、两低（低生产率、低质量）的重大措施，取得显著成效。在湿法再生和气力送砂系统中，如水力提升机、水力旋流器、旋风除尘器和水浴除尘器等流体设备，它们的工作原理以及如何改进，提高它们的效率，这些都与流体力学有密切关系。

湿法砂再生的水力输送和热气流烘砂及干砂的气力输送，是以一定速度运动着的水流或气流来输送粉、粒状物料，这是属于两相流的问题，前者是水——固两相流；后者是气——固两相流。因此，对铸造专业来说，不仅要研究纯水、纯空气流动的力学规律，还应当研究两相流的特点和它具有的力学规律。

流体流动的动力，主要是来源于流体机械，例如水力输送的动力靠高压水泵，化铁炉的送风助燃和气力输送的动力靠鼓风机或高压通风机等动力设备。为了选择合适的定型设备，学习了解专业常用的泵与风机构造、工作原理和它们的性能参数，是十分重要的。

随着科学的发展，铸造机械中液压传动的应用正在迅速增多，作为造型机械发展方向之一的，高压（多触头）造型机，射、挤压造型机都广泛使用液压传动，抛砂机的大小臂运动，清理滚筒门的开闭，电炉炉盖的开闭及炉体的回转等，都常使用液压传动。还有一些新设计的高度机械化的铸工车间，有使用集中泵站，用管道将加压液体送到各种设备，来驱动设备运转，即整条生产线都用液压传动。液压传动管路系统压液流速的选择、压力损失的计算、油泵的选择都与流体力学的基础理论知识密切相关。

目 录

绪 论

第一篇 流体力学理论基础

第一章 流体及其主要物理性质	1
§ 1-1 流体的定义, 连续介质的概念	1
§ 1-2 流体的主要物理性质	1
第二章 流体静力学	14
§ 2-1 流体静压力及其特性	14
§ 2-2 流体静力学基本方程	17
§ 2-3 压力的测量	27
§ 2-4 平面上液体总压力	32
§ 2-5 曲面上液体总压力	36
§ 2-6 旋转容器中液体的相对平衡	42
第三章 流体动力学	54
§ 3-1 流体动力学基本概念	54
§ 3-2 流体稳定流动连续性方程	58
§ 3-3 流体运动的能量方程——伯努利方程	61
§ 3-4 稳定流的动量方程	78
第四章 流体运动的阻力和水头损失	91
§ 4-1 能量损失的两种类型	91
§ 4-2 层流、紊流、雷诺实验	92
§ 4-3 层流运动的分析	98
§ 4-4 圆管紊流运动的特性	104
§ 4-5 紊流沿程损失的基本关系式	107
§ 4-6 系数 λ 和 C 的公式	108
§ 4-7 局部损失	118
第五章 管咀出流和流速流	137
§ 5-1 管咀 (喷咀) 出流	137
§ 5-2 流量与流速的测定——毕托管	140
§ 5-3 其他型式流量计简介——文德里流量计, 转子流量计, 直角三角形堰	152
§ 5-4 测试仪表的安置要求	157
第六章 气固两相流的基本知识	164
§ 6-1 物料特性参数	164
§ 6-2 悬浮速度	170
§ 6-3 固气混合体的物理性质	185

§ 6-4 水平管道与垂直管道物料运动状态	188
-----------------------	-----

第二篇 泵与风机

概 述	192
第七章 风 机	196
一、离心式通风机	196
§ 7-1 离心式通风机的构造、工作原理及其型式	196
§ 7-2 离心式通风机的压力、风量(流量)、功率和效率	203
§ 7-3 通风机的性能	205
§ 7-4 通风机在管道中的工作	233
§ 7-5 通风机的工况调节	236
§ 7-6 离心式风机的选择	238
二、离心式鼓风机	240
§ 7-7 离心式鼓风机的构造和工作原理	241
§ 7-8 离心式鼓风机的风量、压力、功率和效率	243
§ 7-9 离心式鼓风机的性能	246
三、回转式鼓风机(定容式鼓风机)	249
§ 7-10 罗茨鼓风机	249
§ 7-11 叶氏鼓风机构造	256
四、真 空 泵	260
§ 7-12 水环式真空泵	260
第八章 泵	268
一、离心式泵	268
§ 8-1 离心式泵的构造、装置概要和工作原理	268
§ 8-2 离心泵的类型	272
§ 8-3 水泵的基本参数——水头(扬程)、吸水高度、流量、功率、效率和转数	275
§ 8-4 离心式泵的性能	280
§ 8-5 离心水泵在管道中的工作	287
§ 8-6 离心水泵的选择	288
§ 8-7 离心式砂泵	289
二、活塞水泵和柱塞水泵	294
§ 8-8 活塞水泵与柱塞水泵的构造及工作原理	294
§ 8-9 活塞水泵与柱塞水泵的水头(或压力)、流量、功率和效率	295
§ 8-10 水力清砂常用型号的柱塞泵	297

第一篇 流体力学理论基础

第一章 流体及其主要物理性质

§1-1 流体的定义，连续介质的概念

流体是液体和气体的总称。从日常生活中我们知道水、酒精、油、水银、空气、烟气都是流体。流体是由一系列连续质点组成、且质点非常容易推移的一种物体，在任何微小的剪力作用下都能产生巨大的变形。把它装在什么形状的容器里它就是什么形状。

我们知道，固体在切力、拉力作用下能保持静止状态，要改变固体的形状，必须给一定值的力作用到固体上，这个作用力有时还须达到很大的值；然而，对于气体和液体，只有在其四周同时施以压力时，才会发生很大的抗力。如果施以很小的切力，流体就会作缓慢的滑动。这就说明了，流体具有固体所没有的基本属性，叫做流动性。

如果在水盆水面上吹气，水面就会发生皱纹；在玻璃板上倒一滴水并将玻璃板稍为倾斜，水就沿玻璃板面往低处流动；烟囱出来的烟气受微风一吹动就能飘荡。这一切都是流体流动性的表现。正因为这种内因的存在，才能实现流体在外力作用下，通过管道连续地输送到指定地点。例如，在铸造生产中将空气输送到化铁炉中；熔融金属在静压头作用下经浇注系统流入铸型中。

在工程实践中研究的流体总占有一定的体积，即使在很小的体积中（例如1厘米³）也由无数质点所充满，为一内部无空隙的连续体。在解决工程实际问题时，是着眼于研究表征流体质点集体特性的量（如流体的密度、压力、速度），即考虑流体的宏观机械运动。因此我们在研究流体的平衡和运动问题时，可将流体视为具有连续性的连续介质，这样就很方便地用数学连续函数来解决流体力学的问题。

§1-2 流体的主要物理性质

流体在不同的外力作用下，具有一定的平衡和运动规律，主要是由流体内部的重力作用、惯性作用、粘滞性作用及它们间的相互作用所决定的。因此，在研究流体平衡和运动规律之前，首先应对流体的物理性质有所了解。

1. 重度、密度和比重

任何物质在地球上，都要受到地球的吸引力，这个力就是重力，通常称为重量。从

力的观点看，重力常常反映为某一定流体体积的重量。

(1) 重度：单位体积流体所具有的重量。

对均质流体：

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

式中： γ —流体重度；

G —流体重量；

V —流体体积。

单位：如果 G 的量纲以 $[F]$ 表示， V 的量纲以长度立方 $[L^3]$ 表示，则 γ 的量纲为 $[E/L^3]$ 。

物理单位制中，力以达因、长度以厘米表示，则重度的单位为：达因/厘米³

工程单位制中，力以公斤，长度以米表示，则重度的单位为：公斤/米³

(2) 密度：单位体积流体所具有的质量。

对均质流体：

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

式中： ρ —流体密度；

M —流体质量；

V —流体体积。

根据牛顿第二定律，重力与质量有下列关系： $G = mg$ ， m 表示物体质量， g 表示重力加速度。等式两边除以流体体积，即可写成：

$$\begin{aligned} \frac{G}{V} &= \frac{m}{V} g \\ \gamma &= \rho g \\ \rho &= \frac{\gamma}{g} \end{aligned} \quad (1-3)$$

ρ 的量纲为：

$$\rho = \frac{F/L^3}{L/T^2} = \left[\frac{FT^2}{L^4} \right];$$

ρ 的物理单位为：达因·秒²/厘米⁴；

ρ 的工程单位为：公斤·秒²/米⁴

表(1-1)列出了重度与密度的工程单位和物理单位、以及根据 1 克重 = 981 达因建立的换算关系。

重度与密度的工程单位物理单位及其换算关系 表 1-1

单位制	重 度 $\gamma [F/L^3]$	密 度 $\rho [FT^2/L^4]$
工程单位	公斤/米 ³	公斤·秒 ² /米 ⁴
物理单位	达因/厘米 ³	达因·秒 ² /厘米 ⁴ = 克/厘米 ³
换算关系	1 公斤/米 ³ = 0.981 达因/厘米 ³	1 公斤·秒 ² /米 ⁴ = 9.81 × 10 ⁻³ 克/厘米 ³

例 1-1 一杯燃料油，用量杯量出体积为492厘米³，在天秤上称得重量为 0.446 公斤。试求以工程单位计的和以物理单位计的重度和密度各为若干？

解：由(1—1)式可求出工程单位表示的重度。

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{0.446}{492 \times 100^{-3}} = 908 \text{ (公斤/米}^3\text{)}$$

由(1—3)式可求出以工程单位表示的密度。

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{908}{9.81} = 92.3 \text{ (公斤} \cdot \text{秒}^2\text{/米}^4\text{)}$$

然后，依据表 1-1 换算关系，可求出相应的物理单位：

$$\gamma = 908 \times 0.981 = 890 \text{ (达因/厘米}^3\text{)}$$

$$\rho = 92.3 \times 9.81 \times 10^{-3} = 0.905 \text{ (克/厘米}^3\text{)}$$

应当注意区别比重与重度两个概念：比重是物体重量与其同体积水（4℃）的重量之比，没有量纲；而重度是有量纲的。在工程单位中两者在数值上一般是不相同的，只有当重度采用吨/米³、公斤/升、克/厘米³的单位时，两者的数值才相等。因为在上述三种单位中，4℃的水其重度都是 1（ $\gamma_{\text{水}} = 1000 \text{ 公斤/米}^3 = 1 \text{ 吨/米}^3 = 1 \text{ 公斤/升}$ ）

2. 压缩性和膨胀性

压缩性是指流体在压力作用下能改变自身体积的特性，膨胀性是指温度变化时流体体积变化的特性。在这两种物理性质上，液体与气体差别很大，这也是区别液体与气体的主要依据。因此必须分别讨论。

(1) 液体的压缩性和膨胀性

压缩性：在温度不变的条件下，压力增大 1 个大气压时，液体体积相对减少的数值。以体积压缩系数 β_p 来表示。

$$\beta_p = - \frac{dV}{V dp} \quad (\text{厘米}^2\text{/公斤)} \quad (1-4)$$

式中： dp —压力变化（公斤/厘米²）

dV/V —体积变化率（米³/米³）

负号表示意义——由于压力增加，体积减少，即 dp 为“+”， dV 为“-”，因此公式中加一个“-”号，才能使 β_p 永为正值。

表 1-2 中列出了在温度 0℃ 时不同压力下水的 β_p 值

0℃ 水在不同压力下 β_p 值

表 1—2

大 气 压	5	10	20	40	80
$\beta_p \times 10^{-4}$ (厘米 ² /公斤)	0.529	0.527	0.521	0.513	0.505

从表 1—2 中可知，当水温度为 0℃ 压力为 5 个大气压的情况下，水的体积压缩系数 $\beta_p = 0.529 \times 10^{-4}$ ，这表明压力每增加一个大气压，水的体积只改变万分之零点五左右。因而，工程上认为水是不可压缩的，与水类似，其它液体的压缩性也很小。但在一些特殊问题（如水击现象）中必须考虑液体的压缩性，否则将引起很大的误差。

膨胀性：温度升高 1℃ 时所引起的液体体积变化率，以温度膨胀系数 β_t 表示。

$$\beta_t = \frac{dV}{V dt} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (1-5)$$

式中 t 为摄氏温度。

图 1-1 给出了在一个大气压下水的重度与温度的变化规律，在温度较低时（10~20℃），温度每增加 1℃，水的体积仅仅变万分之一点五；温度较高时（90~100℃），也只改变万分之七。可见重度随温度的变化是极小的，因此在实际计算中一般不考虑液体的温度膨胀性。

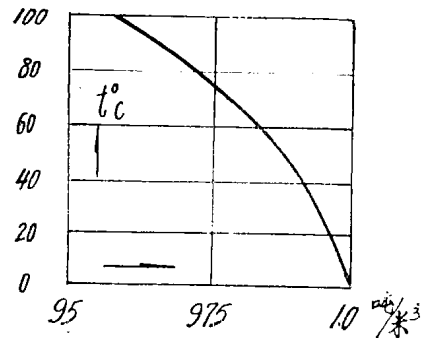


图 1—1 大气压下水的 $\gamma = f(t)$ 曲线

因此，当压力及温度变化范围不大时，可以认为液体体积不发生变化，从而液体的重度及密度也不随温度和压力变化的。在工程上常称液体为不可压缩流体（习惯上常记为 $\rho = \text{常数}$ 、 $\gamma = \text{常数}$ ）。

表 1—3 列出了几种常见的流体重度。

几种常见流体的重度（一个大气压下）

表 1—3

液 体	重 度 (公斤/米 ³)	温 度 (℃)	气 体	重 度 (公斤/米 ³)	温 度 (℃)
水	1000	4	空 气	1.293	0
铜 合 金	8200	1000	氧	1.429	0
水 银	13600	0	氢	0.0899	0
钢	7200	1550	一氧化碳	1.250	0
酒 精	789	20	二氧化碳	1.976	0
熔化生铁	6800~7000	1200~1280	氯	3.217	0
润滑油(矿)	900~930	15	氫	0.179	0
重 油	890~940	15	氮	2.927	0
铝 合 金	2600	720~810	二氧化硫	1.251	0

(2) 气体的压缩性和膨胀性

气体总是力图充满给以它的空间而变化自己的密度，因而气体没有固定的容积。用一个形象的例子来说明：在容器中可以盛半杯液体，但不能只盛半容器的气体。如果没有

容器的限制，或者说没有外力加在一定质量的气体上，它的膨胀将是无止境的。所以液体有自由表面，而气体无自由表面，只有外加一定的压力才能限制气体取一定的容积。同时，在压力不变的情况下，气体容积又取决于温度。因此温度和压力的变化都将引起气体体积、密度、重度的显著变化。其关系可用理想气体状态方程式来表示。

$$\left. \begin{aligned} pV &= RT \\ p/\gamma &= RT \\ p/\rho &= gRT \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

式中： p —绝对压力（公斤/米²）；
 V —比容（重度的倒数 $V = 1/\gamma$ ）（米³/公斤）；
 R —气体常数（公斤·米/公斤·K）；
 空气 $R = 29.27$
 ρ —气体密度（公斤·秒²/米⁴）
 T —绝对温度（开尔文度，K）

由(1-6)式可知 γ 、 ρ 都是 p 、 T 的函数，
 若保持温度不变（恒温过程）

则
$$\frac{p_0}{\gamma_0} = \frac{p}{\gamma} \quad (1-7)$$

(1-7)式反映了这样一个实际情况：气体是很容易压缩的。当气体稍加一点压力时，它的体积就有显著减小，压力愈大体积愈小密度愈大；反之减小气体压力体积就要膨胀密度就要减小。气体的这个特性，在铸造机械中被利用来设计气垫缓冲机构如图(1-2)所示。

若保持压力不变（等压过程）则有：

$$T_0 \gamma_0 = T \gamma \quad (1-8)$$

(1-8)式反映了气体的另一属性：即空气温度愈高密度和重度就愈小。因而不同温度下气体的重度 γ 值可用以下关系式求出：

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\gamma_0 T_0}{T} = \gamma_0 \frac{273}{273+t} \\ &= \frac{\gamma_0}{\frac{273+t}{273}} = \frac{\gamma_0}{1 + \frac{1}{273}t} = \frac{\gamma_0}{1 + \beta t} \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中： $\beta = \frac{1}{273}$ —称为气体膨胀系数；

γ_0 —一个大气压、0℃状态下气体的重度。

如果没有放热和吸收热量，理想气体的绝热变化，根据热力学将是：

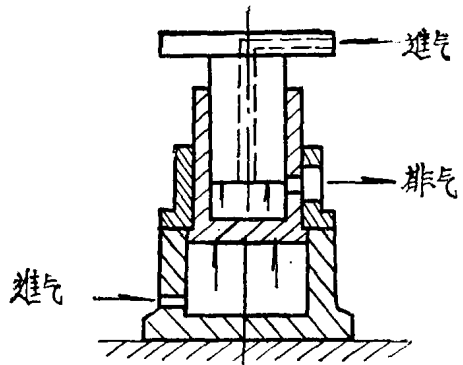


图 1-2 气垫缓冲

$$\frac{p}{\gamma^k} = \text{常数} \quad (1-10)$$

式中： $K = C_p/C_v$ ，即定压比热与定容比热之比值。大气中、空气的绝热指数 K 为 1.405。

气体虽然是可压缩和可膨胀的，但当气体的流动速度不超过 50~70 米/秒及压力和温度变化很小时（例如干砂的低压或低真空气力输送系统），气体的重度、密度仍然可以看成是常数，这种气体称为未压缩气体，它的计算问题就和不可压缩的液体问题一样来处理。但在热气流烘砂的低真空气力输送系统中，温度从 200℃ 降至 50℃，这时气体的重度应按等压过程的(1-8)式来计算。

例 1-2 当测定气动微震造型机的耗气量时，首先将容积 $V = 5m^3$ 的气源贮气罐充气压力达 $p_1 = 6$ 个绝对大气压。测定时，造型机工作 10 秒后，贮气罐压力下降到 $p_2 = 5.5$ 个绝对大气压。试求造型机每分钟消耗的自由空气量为若干？

解：贮气罐内空气变化过程，可视为等温过程，因此贮气罐压力变化前后气体的重度按(1-7)式计算。

贮气罐内原有空气重量：

$$G_1 = \gamma_1 V \quad \text{而} \quad \gamma_1 = \gamma_0 \frac{p_1}{p_0}$$

工作 10 秒钟后剩下的空气重量：

$$G_2 = \gamma_2 V \quad \text{而} \quad \gamma_2 = \gamma_0 \frac{p_2}{p_0}$$

10 秒钟消耗的空气质量：

$$G_{10} = G_1 - G_2 = \gamma_0 V \left(\frac{p_1 - p_2}{p_0} \right)$$

每分钟消耗的空气重量：

$$G = 6G_{10} = 6\gamma_0 V \left(\frac{p_1 - p_2}{p_0} \right)$$

每分钟消耗自由空气量：（即压力为 p_0 ，温度 0℃ 为时空气体积）。

$$Q_0 = \frac{G}{\gamma_0} = 6V \frac{p_1 - p_2}{p_0} = 6 \times 5 \frac{6 - 5.5}{1} = 1.5 \text{ 米}^3/\text{分}$$

(3) 流体的粘性。

粘滞性是流体固有的物理特性。水有粘性油有粘性，任何实际流体都有，只不过大小不同而已。我们在日常生活中就可以感觉到，在水中拖木板时需要用点力，若在油中拖木板时，用的力就比前者更大些。因此，我们习惯上常说油比水“粘”些，或者说油比水粘性大。另外，一杯水和一杯油并排放在桌上，都是静止流体，看不出谁的粘性大，如果将它们往外倒，油的流动就不象水那么快，粘性的不同就表现出来了。这说明粘滞性要显示出来，流体质点之间必须有相对运动。从力学观点来看，粘滞性为引起流体间内摩擦的性质。

如水在管道中流动时，由于水对固体边界有附着作用，接触边界第一层水附着在固

体边界上，第一层不流动的水通过水的内聚力作用而影响第二层水的流速；第二层水又由于内聚力而影响第三层水的流度，……因此，紧靠固体边界附着层的流速最小，随着离开固体边界距离的增加，流速逐层增大，形成图(1-3)的速度分布规律。流动成一层一层的进行，运动较快的层，带动运动较慢的层，反之运动较慢的层又阻碍运动较快层的流动，快层便从慢层上运动过去，类似于固体，相邻层间就产生摩擦力。单位面积上摩擦力称为切应力。粘性力是阻滞流体运动的，当流体克服这种阻力而继续运动时，就必然要消耗自身的能量。所以粘性是造成运动流体机械能损失的根源。

② 粘性定律：

试验证明内摩擦力与相邻两层流体层间的速度差 du 成正比；与相邻两流体层间厚度 dn 成反比；与两层接触面积 A 的大小成正比；还与被试验的流体性质有关，综合的结果可写成：

$$T = \pm \mu \cdot \frac{du}{dn} \cdot A \quad (1-11)$$

单位面积上的内摩擦力（即切应力）以 τ 表示，则

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dn} \quad (1-12)$$

(1-11)及(1-12)式称为粘性定律或牛顿内摩擦定律

式中： T — 内摩擦力（公斤）；

τ — 切应力（公斤/厘米²）；

du/dn — 速度梯度（1/秒）；

μ — 动力粘性系数或动力粘度（与流体种类有关）

\pm — 当 $du/dn > 0$ 取“+”号
当 $du/dn < 0$ 取“-”号 } 使 T 、 τ 永为正值

注意：1) 切应力 τ 是成对出现的。它的方向这样决定：速度快的一层带动慢的一层，对慢的一层讲，切应力方向与流体流动方向相同；速度慢的一层阻滞速度快的一层，对快的一层，切应力方向与水流流动方向相反，如图(1-3)中阴影水体上所表示的切应力方向。

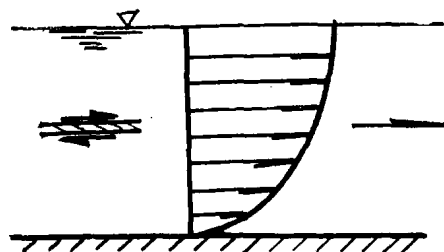


图 1-3 速度分布规律

2) 当流体静止时，

$$\frac{du}{dn} = 0, \quad T = 0, \quad \tau = 0$$

流体不呈现粘性。

③ 粘性系数：

粘性系数的物理意义：

因为 $\mu = \pm \frac{\tau}{du/dn}$, 如果 $\frac{du}{dn} = 1$, $\mu = \tau$, μ 就表示当 $\frac{du}{dn} = 1$ 时, 在相互接触的两层流体单位面积上的内摩擦力 (即切应力)

粘性系数的单位:

$$\mu \text{ 的量纲为: } [\mu] = \left[\frac{\tau}{du/dn} \right] = \frac{F/L^2}{L/(L \cdot T)} = \frac{F \cdot T}{L^2}$$

μ 的物理单位为: 达因·秒/厘米² 称为 1 泊在实际应用上常用单位为厘泊, 1 厘泊 = 0.01 泊。

μ 的工程单位为: 公斤·秒/米²

在流体力学实际计算中常用运动粘性系数, 运动粘性系数是动力粘性系数与流体密度的比值。

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

$$\nu \text{ 的量纲为 } [\nu] = \left[\frac{\mu}{\rho} \right] = \frac{(F \cdot T)/L^2}{(F \cdot T^2)/L^4} = \frac{L^2}{T}$$

ν 的物理单位为: 厘米²/秒, 称为 1 斯;

ν 的工程单位为: 米²/秒, 在工程计算上 ν 的常用单位为厘斯, 1 厘斯 = 0.01 斯 = 0.01 厘米²/秒。

μ 与 ν 的单位及其换算关系见表(1-4)

μ 与 ν 的单位及其换算关系

表 1-4

单 位 制	$\mu (F \cdot T / L^2)$	$\nu (L^2 / T)$
工 程 单 位	公斤·秒/米 ²	米 ² /秒
物 理 单 位	达因·秒/厘米 ² = 泊	厘米 ² /秒 = 斯
换 算 关 系	1 公斤·秒/米 ² = 98.1 泊	1 米 ² /秒 = 10 ⁴ 斯

目前各种不同流体计算粘性系数的经验公式种类颇多, 在实际中应用这些公式也较麻烦。前人在这方面已作了大量的工作, 就是将常用流体的粘性系数列成数表可供查阅。下面介绍工程上常用流体的 μ 和 ν 的实验数据。

空气在标准气压不同温度下的 ν 值

表 1-5

温 度 (°C)	ν (厘米 ² /秒)	温 度 (°C)	ν (厘米 ² /秒)	温 度 (°C)	ν (厘米 ² /秒)
0	0.1370	40	0.1760	80	0.2170
10	0.1470	50	0.1860	90	0.2290
20	0.1570	60	0.1960	100	0.2378
30	0.1660	70	0.2045	120	0.2620

水的 ν 与温度关系

表 1-6

t (°C)	ν (厘米 ² /秒)	t (°C)	ν (厘米 ² /秒)	t (°C)	ν (厘米 ² /秒)	t (°C)	ν (厘米 ² /秒)
0	0.0179	7	0.0143	14	0.0118	40	0.0066
1	0.0173	8	0.0139	15	0.0115	50	0.0055
2	0.0167	9	0.0135	16	0.0112	60	0.0048
3	0.0162	10	0.0131	17	0.0109	70	0.0042
4	0.0157	11	0.0127	18	0.0106	80	0.0037
5	0.0152	12	0.0124	19	0.0101	90	0.0033
6	0.0147	13	0.0121	20	0.0081	100	0.0030

常见液体 μ (泊) 与温度的关系

表 1-7

液体种类 \ 温度(°C)	0	10	20	30	40	80
润滑油	6.4		1.720		0.540	0.220
甘油	46	22.5	8.720	3.80	1.06 (50°C)	
酒精	0.0177	0.0145	0.0119	0.099	0.0083	0.0059
水银	0.0170		0.0157			0.0122 (100°C)

金属液体的 μ 值

表 1-8

金属成份	t °C	μ (泊)
工业纯铁		0.040
钢 [C3%]	1535	0.028
	1555	0.026
	1610	0.023
铸铁 [C3%]	1238	0.024
	1267	0.0213
	1296	0.0188
	1325	0.0169
	1354	0.0154

常见气体的 μ 、 ν 值 (0°C, 一个大气压)

表 1—9

气 体	$10^4\mu$ (泊)	ν (斯)	气 体	$10^4\mu$ (泊)	ν (斯)
空 气	1.70	0.133	二 氧 化 碳	1.41	0.0715
氮	1.67	0.123	一 氧 化 碳	1.63	0.131
氧	1.90	0.134	水 蒸 汽	0.82	0.102
氢	0.85	0.945			

另外, 气体 μ 与温度关系, 还可由如下经验公式确定:

$$\mu = \mu_0 \frac{1 + \frac{C}{273}}{1 + \frac{C}{T}} \sqrt{\frac{T}{273}} \quad (1-14)$$

式中 μ_0 为 0°C 时动力粘性系数 (如表 1—9 所示), T 为绝对温度 °K, C 为常数依气体种类而定, 如表 1—10 所示:

不同气体常数 C 值

表 1—10

气 体	空 气	氢	氧	氮	水蒸汽	二氧化碳	一氧化碳
常 数 C	122	83	110	102	961	260	100

④ 影响粘性系数的因素:

从上述数表中可得出如下结论:

(1) 粘性与温度有显著关系。此关系随流体的种类不同而相异。气体的粘性随温度的升高而加大; 液体的粘性则随温度的升高而减小, 这是由于液体与气体分子性质不同的缘故。

气体分子间引力很小, 形成气体运动时各层间切应力的主要原因是: 垂流方向上的分子扰动所产生的各层间的动量交换。我们知道, 分子的活动性是随着温度的增加而增加的, 所以气体的切应力和它的粘性系数是随着温度的增加而加大。

液体因分子扰动而产生的动量交换影响, 小于分子引力的影响, 所以液体的切应力和它的粘性系数多半是由它的引力大小来决定的。由于温度的增加, 液体的分子引力将减小, 所以液体的粘性系数, 将随温度的增加而域少。

(2) 粘性与压力的关系。严格说来, 任何流体的粘性都是随着流体的温度、压力改变而变化, 但在一般情况下, 压力影响很小, 可以忽略不计, 这也是液体与固体摩擦力的原则区别, 固体间的摩擦力与法向压力成正比。但是, 当液体压力超过 50 个大气压时 (如在液压传动中) 就需要考虑压力的影响, 可用经验公式表示。即:

$$\nu = \nu_0 e^{bP} \quad (\text{厘米}^2/\text{秒}) \quad (1-15)$$

式中: ν_0 —为一个大气压下粘性系数值; (厘米²/秒)

P —为液压油承受的压力; (公斤/厘米²)

b —为与液体种类有关的指数

对液压油 $b = 0.002 \sim 0.003$

气体粘性系数随压力变化而变，具体计算时可按下式换算。即：

空气在 10 个大气压下的 ν 值为：

$$\nu_{10} = \nu_0 \cdot \frac{\rho_0}{\rho_{10}} = 0.133 \cdot \frac{\gamma_0}{\gamma_{10}} = 0.133 \cdot \frac{1.293}{\gamma_{10}}$$

又根据(1-7)式：

$$\gamma_{10} = \gamma_0 \frac{P}{P_0} = 1.293 \cdot \frac{10}{1}$$

$$\nu_{10} = 0.133 \times \frac{1.293}{1.293 \times 10} = 0.0133 \text{ (厘米}^2/\text{秒)}$$

式中： $\nu_0 = 0.133$ (厘米²/秒) 系 0°C，一个大气压下空气的运动粘性系数见表 1-9

⑤ 粘性系数的测定：

液体的粘性系数在工程上常用恩格勒粘度计测定，见图(1-4)。它是一个容量为 200 厘米³ 的金属圆柱容器。先注入 20°C 的蒸馏水，然后换成被试验的液体，在所测温度下，液体通过直径为 3 毫米的圆形小孔由容器出流。被试验液体充满 200 厘米³ 体积所需的时间 t_1 和蒸馏水充满 200 厘米³ 体积所需时间 t_2 ($t_2 = 51$ 秒) 之比称为恩格勒粘度，以 °E 表示。即：

$$^{\circ}\text{E} = \frac{t_1}{t_2} \quad (1-16)$$

求得恩氏度后，可用下面经验公式换算成液体的运动粘性系数 ν 。

$$\nu = 0.0731^{\circ}\text{E} - \frac{0.0631}{^{\circ}\text{E}} \quad (\text{厘米}^2/\text{秒}) \quad (1-17)$$

⑥ 理想流体的概念

自然界存在的流体都是实际流体，实际流体都具有粘性，流动时由于粘性而产生了阻力，粘性的存在是使流体流动的研究变得非常复杂。因而流体力学中常引入“理想流体”的概念，所谓理想流体即是一种绝对不可压缩、当温度改变时也不改变自己的体积和完全失去粘性的流体。引入理想流体概念的目的就在于使问题简化，先按理想流体进行分析，得出一些主要结论，然后再进一步考虑粘性影响进行修正补充，得出实际流体的有关规律。

例 1-3 图(1-5)为一滑动轴承的轴，间隙 $t = 0.1$ 厘米，轴的转速 $n = 180$ 转/分，直径 $D = 1.5$ 厘米，轴承宽度 $b = 25$ 厘米，正常运转时润滑油温度为 40°C，试求润滑油

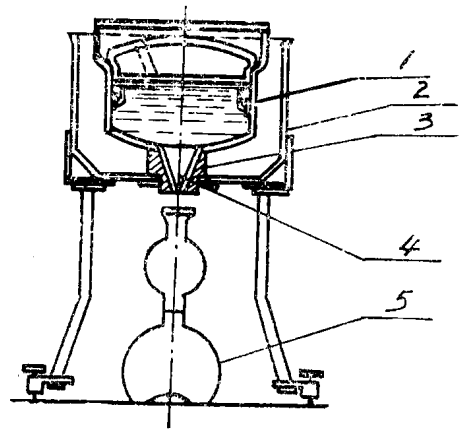


图 1-4 恩格勒粘度计

1—球状底金属圆筒 2—水筒 3—黄铜圆管 4—白金属短管 5—200 厘米³ 量筒

阻力消耗的功率。

解：轴面速度

$$v = \frac{\pi D n}{60} = \frac{3.14 \times 0.15 \times 180}{60} = 1.415 \text{ (米/秒)}$$

因油层很薄，油的速度分布按线性规律考虑，则速度梯度为：

$$\frac{du}{dn} = \frac{v}{t} = \frac{1.415}{0.1 \times 10^{-2}} = 1415 \text{ (1/秒)}$$

40°C 润滑油的动力粘性系数 μ 查表(1—7)得 $\mu = 0.54$ 泊，相应的工程单位为：

$$\mu = \frac{0.54}{98.1} = 0.0055 \text{ (公斤·秒/米}^2\text{)}$$

摩擦力：

$$T = \mu A \frac{du}{dn} = 55 \times 10^{-4} \times 3.14 \times 0.15 \times 0.25 \times 1415 = 0.92 \text{ (公斤)}$$

损耗功率：

$$N = M \cdot \omega = T \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{\pi n}{30} = 0.92 \times 0.075 \times \frac{3.14 \times 180}{30} = 1.3 \text{ 公斤·米/秒} = 0.0175 \text{ (马力)}。$$

思考题及习题

思考题

1—1 怎样根据工程实践要求区分可压缩流体及不可压缩流体？

1—2 流体的重度是不是常数？如果不是常数，又随什么因素变化？

1—3 观察表(1—5)表(1—6)

10°C 空气运动粘性系数 $\nu = 0.147$ 厘米²/秒

10°C 水运动粘性系数 $\nu =$

0.0131 厘米²/秒

上述数字能否说空气的粘性比水大？为什么？

1—4 水体在两平板中流动，流速分布 $u-n$ 图如图(1—6)所示。当从中取出水体 A 及水体 B 作自由体时，试分析水体 A 及 B 上下两平面上所受切应力的方向。

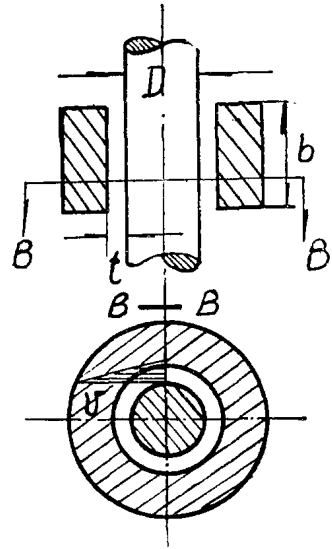


图 1—5 滑动轴承

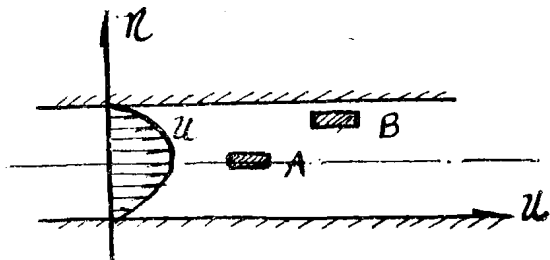


图 1—6 思 1—4 插图