



高等院校规划教材



# 流体力学与流体机械

**Hydromechanics and Fluid Machinery**

主编 孟凡英

煤炭工业出版社



清华大学出版社

# 流体力学与流体机械

LIU TI LI XUE YU LIU TI JI GOU

第 2 版

清华大学出版社

高等院校规划教材

# 流体力学与流体机械

主 编 孟凡英

副主编 郭仁宁 纪俊红 薛 华

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

## 内 容 提 要

全书共分三篇,第一篇流体力学包括绪论、流体静力学、一维流体动力学、流动阻力和能量损失、孔口管嘴及管路计算、相似原理和量纲分析、多维流体运动学和动力学基础、等流体力学的基本概念、原理、应用和一部分重要的近代流体力学知识。第二篇泵与风机主要阐述了叶片式泵与风机的基本工作理论,水泵与风机的结构,水泵与风机在管路中的工作性能、工况调节方法、选型计算方法、运行及维护。第三篇空气压缩机介绍容积式空气压缩机的工作理论、结构特点、运行和维护问题、设备的选择及布置。书中每章提供了大量的思考题和习题。

本书为机械工程与自动化专业、安全工程专业、采矿工程等专业课程教材,也可供煤炭成人教育、煤矿技工学校和干部培训班使用,以及有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

流体力学与流体机械/孟凡英主编. —北京:煤炭工业出版社, 2006  
高等院校规划教材  
ISBN 7-5020-2936-2

I. 流… II. 孟… III. ①流体力学-高等学校-教材  
②流体机械-高等学校-教材 IV. ①O35②TH3

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第082553号

煤炭工业出版社 出版  
(北京市朝阳区芍药居35号 100029)  
网址: www.cciph.com.cn  
煤炭工业出版社印刷厂 印刷  
新华书店北京发行所 发行

开本 787mm×1092mm<sup>1/16</sup> 印张 24<sup>3/4</sup>  
字数 590千字 印数 1—3,000  
2006年11月第1版 2006年11月第1次印刷  
社内编号 5735 定价 45.00元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

# 前 言

本书是在1991年孙尚勇主编的《流体力学与流体机械》教材的基础上，结合以往的教学经验，按照基础性强、专业面宽、理论与实践较好结合，同时适当反映当前本学科发展的新成果的宗旨重新编写的。修编中力求反映如下几点。

1. 体现培养目标和专业特点，突出概念和基础，注重研究方法，适当反映专业需要，由简单到复杂，一般与特殊相结合，分层次编写。对打“\*”号的章节部分内容可按专业需要、学时多少进行取舍。

2. 注意保持教材的先进性和反映流体机械新技术的发展，并注意编写了有关保持和提高设备效率的途径和节能措施。

3. 突出应用，注意保持基本理论方面的系统性。书中附有必要的图表数据和例题，各章后附有本章小结以及思考题与习题。通过例题启发应用和示范解题方法，引导学以致用，促进理论深化，从而培养学生分析问题和解决问题的能力。

总之，希望本教材有利于读者的自学，有利于读者分析问题与解决问题能力的提高，有利于教师的选用。

本教材共分十八章，由辽宁工程技术大学编写，第一章至第十章和第十三章、第十四章由孟凡英编写，第十一章由郭仁宁编写，第十二章由纪俊红编写，第十五章至第十八章由薛华编写。最后由孟凡英统稿并担任主编。

由于水平有限，书中如有不当和错误之处，欢迎批评指正。

**编 者**

2006年8月

# 目 录

## 第一篇 流 体 力 学

第一章 绪论	1
第一节 流体的主要物理性质	1
第二节 作用在流体上的力	12
第三节 流体的力学模型	13
思考题与习题	14
第二章 流体静力学	16
第一节 流体静压强及其特性	16
第二节 重力场中流体的平衡	17
第三节 压强的计算基准和量度单位	23
第四节 液柱式测压计	25
第五节 静止液体作用在固体壁面上的总压力	28
第六节 流体平衡微分方程	34
第七节 液体的相对平衡	37
思考题与习题	40
第三章 一维流体动力学基础	44
第一节 概述	44
第二节 流体运动的基本概念	45
第三节 流体运动的连续性方程	50
第四节 流体定常流能量方程	51
第五节 定常流能量方程应用	58
第六节 流速及流量的测定	61
第七节 流体定常流动量方程	65
思考题与习题	68
第四章 流动阻力和能量损失	72
第一节 流动阻力和能量损失	72
第二节 流体的流动状态	73

第三节	均匀流基本方程 .....	77
第四节	圆管中层流运动及沿程损失 .....	78
第五节	圆管中紊流运动及沿程损失 .....	81
第六节	沿程阻力系数的实验研究 .....	84
第七节	非圆管道沿程损失 .....	88
第八节	管道流动的局部损失 .....	89
	思考题与习题 .....	92
<b>第五章</b>	<b>孔口管嘴出流及管路计算 .....</b>	<b>95</b>
第一节	孔口出流 .....	95
第二节	管嘴出流 .....	98
第三节	管路水力计算 .....	100
第四节	液体通过缝隙流动 .....	107
	思考题与习题 .....	111
<b>第六章</b>	<b>相似原理与量纲分析 .....</b>	<b>114</b>
第一节	流动相似概念 .....	114
第二节	相似定理 .....	116
第三节	量纲分析法 .....	122
	思考题与习题 .....	125
<b>第七章</b>	<b>流体多维流动运动学基础 .....</b>	<b>127</b>
第一节	流体运动的连续性方程 .....	127
第二节	流体微团运动分析 .....	129
第三节	无旋流动 .....	133
	思考题与习题 .....	137
<b>第八章</b>	<b>黏性流体多维动力学基础 .....</b>	<b>139</b>
第一节	黏性流体运动微分方程 .....	139
第二节	绕流运动与附面层理论基础 .....	144
第三节	曲面附面层的分离现象与卡门涡街 .....	151
第四节	绕流阻力和升力 .....	152
	思考题与习题 .....	157
<b>第九章</b>	<b>一维气体动力学基础 .....</b>	<b>159</b>
第一节	描述可压缩流体特征参数 .....	159
第二节	一维气体定常流动方程 .....	165
	思考题与习题 .....	166

## 第二篇 泵 与 风 机

第十章 概述	167
第一节 泵与风机在国民经济中的地位和作用	167
第二节 泵与风机的分类及工作原理	167
第三节 叶片式泵与风机的性能参数	171
思考题与习题	173
第十一章 叶片式泵与风机	174
第一节 离心式泵与风机的基本理论	174
第二节 轴流式泵与风机的基本理论	185
第三节 比例定律及比转数	189
第四节 叶片式泵与风机的结构	199
思考题与习题	215
第十二章 矿山排水设备	218
第一节 矿山排水设备概述	218
第二节 离心式水泵在管路中的工作	223
第三节 矿用离心式水泵	234
第四节 排水设备的运行与维护	238
第五节 矿山排水设备的选型设计	247
思考题与习题	257
第十三章 矿山通风设备	260
第一节 通风机在网路中的工作	260
第二节 矿用通风机及辅助装置	273
第三节 矿山通风设备的运行与维护	291
第四节 矿山通风设备的选型设计	299
思考题与习题	310

## 第三篇 空气压缩机

第十四章 概述	312
第一节 空气压缩机的用途及类型	312
第二节 矿用空气压缩机的工作原理及特点	314
思考题与习题	319



<b>第十五章 活塞式空压机工作理论及构造</b> .....	320
第一节 活塞式空压机理论工作循环.....	320
第二节 活塞式空压机实际工作循环.....	323
第三节 活塞式空压机的两级压缩.....	326
第四节 活塞式空压机排气量、功率和效率.....	329
第五节 活塞式空压机的构造.....	332
思考题与习题.....	347
<b>第十六章 螺杆式空压机工作理论及构造</b> .....	348
第一节 螺杆式空压机的工作理论.....	348
第二节 螺杆式空压机的排气量、功率和效率.....	350
第三节 螺杆式压缩机转子型线.....	354
第四节 螺杆式空压机的构造.....	358
思考题与习题.....	366
<b>第十七章 空压机的运行及维护</b> .....	367
第一节 空压机的运行操作.....	367
第二节 空压机的常见故障及排除方法.....	368
第三节 活塞式空压机的拆卸与装配.....	370
第四节 空压机性能的测定.....	371
思考题与习题.....	376
<b>第十八章 矿山压气设备的选型设计</b> .....	377
第一节 压气设备选型设计计算.....	377
第二节 空压机站位置及机房设备布置.....	383
思考题与习题.....	386
<b>参考文献</b> .....	388

# 第一篇 流体力学

## 第一章 绪论

流体力学是以流体（液体和气体的统称）为研究对象，研究其平衡和运动基本规律的科学。它主要研究流体平衡的条件及压强分布规律；研究流体运动的基本规律；研究流体流过某通道或绕流某物体时的速度分布、压强分布、能量损失以及流体与固体间的相互作用。

流体与固体在物理性质方面有很大的差异，随着生产的需要和科学的进步，流体力学从物理学中分离出来，并逐渐发展、形成了一门独立的学科。它是人类在长期与自然灾害作斗争的过程中，逐步认识和掌握自然规律而发展形成的，是人类集体智慧的结晶。

流体力学在许多工业技术中有着广泛的应用，也是传热学、燃烧学等学科的重要基础理论之一。在采矿工业中的通风、排水、压气以及矿物的分选中离不开流体力学理论作为基础。机械工业中的润滑、冷却、液压传动及控制等必须依靠流体力学的基本理论。水利工程的建设、造船工业的发展同水静力学的建立和水动力学的发展是密切相关的。航空工业中各种飞机和飞行器的设计，都要依据空气动力学和气体动力学的基本原理。在电力工业中，不论是水电站、火电站，还是核电站、地热电站，它们的工作介质都是流体，所以动力设备的设计都必须符合流体流动的规律。在冶金工业中，则会遇到像气体在炉内的流动、液态金属在炉内或铸模内的流动以及冷却、通风等流体力学问题。在化学工业中的流体力学问题则更多，因为大部分化学工艺流程都是伴随有化学反应、传质、传热的流动过程。石油工业中也有大量的流体力学问题，例如油、气的自喷问题，油、气、水的渗流、抽吸和输送问题，以及原油中多种产品的提炼、分离等。土木建筑工程中的给水排水、供热通风、空气调节、燃气供应、灰浆的管道输送是流体力学问题，海洋中的波浪、环流、潮汐以及大气中的气旋、环流和季风等都是流体力学问题。人体的循环系统也是流体系统，像人工心脏、心肺机、助呼吸器等的设计都要依据流体力学的基本原理。因此，流体力学是高等学校的采矿类、机械类、土建类、环境与安全类、交通运输类专业以及船舶与海洋工程、纺织工程、化学工程、自动化等专业的重要专业基础课。

在学习流体力学时，应该把注意力集中在基本概念、基本原理、基本计算方法和实验技能的理解和掌握上，要学会灵活地分析和解决工程中的各种流体力学问题，为学好后续课程和进一步研究流体在实际工程中的特殊流动规律奠定坚实的基础。

### 第一节 流体的主要物理性质

流体的运动要素及变化规律是由流体的物理性质所决定。因此，研究流体的平衡和运动规律时，必须对流体的物理性质加以理解。

从物理学的观点看，自然界中的物质都是由无数分子构成的，按照分子聚集状态的不同，从宏观上可将它们分为三相（三态），即固相（固态）、液相（液态）和气相（气态）；并分别称其对应的物质为固体、液体和气体。固体分子的密集程度最高，液体次之，气体最低。通常说能够流动的物质为流体；按照力学的术语进行定义，则在任何微小切力的作用下都能够发生连续变形的物质称为流体。

流体在给定的切力作用下，将产生连续的变形，当切力停止作用时，流体只是停止变形，而不能恢复到原来的位置，这就是流体的流动性。在静止状态下，流体仅能够承受法向应力，只有在运动状态下才能够同时承受法向应力和切向应力；流体的形状取决于容器的形状。

液体和气体都有易于流动的共同特征。在相同的外部条件下，液体分子和气体分子的大小并无明显差异，但气体所占的体积约为同质量液体的 $10^3$ 倍，即气体的分子分布比液体稀疏得多。气体的分子距很大，易压缩；液体的分子距较小，不易压缩。气体分子间的引力非常微小，气体分子可以自由运动，故气体极易流动；而液体分子间的引力较大，分子间相互制约，它可以做无一定方向和周期的不规则振动，也可在其他分子间移动，但不能像气体分子那样自由运动，故液体的流动性不如气体。

流体的流动性是流体便于用管道、渠道进行输送，适宜作供热、供冷等工作介质的主要原因。流体抗压能力较强的特性和流动性相结合，使水压力能够推动水力发电机发电，蒸汽压力推动汽轮发电机发电，液压、气压能够传动各种机械。

### 一、惯性

惯性是物体维持原有运动状态的性质。表征某一流体的惯性大小可用该流体的密度。对于均质流体，单位体积的质量称为密度，以 $\rho$ 表示。即

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

式中  $\rho$ ——流体的密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ；  
 $m$ ——流体的质量， $\text{kg}$ ；  
 $V$ ——该质量流体的体积， $\text{m}^3$ 。

各点密度不完全相同的流体，称为非均质流体。非均质流体中某点的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-2)$$

式中  $\rho$ ——某点流体的密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ；  
 $\Delta m$ ——微小体积 $\Delta V$ 内的流体质量， $\text{kg}$ ；  
 $\Delta V$ ——包含该点在内的流体体积， $\text{m}^3$ 。

### 二、重力特性

流体受地球引力作用的特性，称重力特性，常用重度来表征。对于均质流体，作用于单位体积流体的重力称重度，以 $\gamma$ 表示。即

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

式中  $\gamma$ ——流体的重度， $\text{N}/\text{m}^3$ ；

$G$ ——体积为  $V$  的流体所受的重力,  $N$ ;

$V$ ——重力为  $G$  的流体体积,  $m^3$ 。

与一点的密度相同, 对于非均质流体, 任一点的重度为

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (1-4)$$

式中  $\gamma$ ——某点流体的重度,  $N/m^3$ ;

$\Delta G$ ——微小体积  $\Delta V$  的流体重力,  $N$ ;

$\Delta V$ ——包含该点在内的流体体积,  $m^3$ 。

重量是质量和重力加速度的乘积, 即

$$G = mg$$

两端同除以体积  $V$ , 则得重度和密度的常用关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-5)$$

式中  $g$ ——重力加速度, 采用  $g=9.81m/s^2$ 。

在计算中常用的几种流体密度和重度为

水:  $\rho=1000kg/m^3$ ,  $\gamma=9810N/m^3$ ;

汞:  $\rho_{Hg}=13590kg/m^3$ ,  $\gamma_{Hg}=133318N/m^3$ ;

干空气:  $\rho_a=1.2kg/m^3$ ,  $\gamma_a=11.77N/m^3$  (压强为 760mmHg, 温度为 20°C)。

表 1-1 列出了在标准大气压强下几种常用流体的密度和重度。

表 1-1 几种常用流体的密度和重度

流体名称	温度 $t/^\circ C$	密度 $\rho/ (kg \cdot m^{-3})$	重度 $\gamma/ (N \cdot m^{-3})$
清水	4	1000	9810
海水	15	1020~1030	10000~10100
汽油	15	700~750	6860~7360
煤油	15	790~820	7750~8044
柴油	15	875	8584
润滑油	15	890~920	8731~9025
液压油	15	860~900	8437~8829
酒精	15	790~800	7750~7848
水银	0	13590	133318
空气	0	1.293	12.68
空气	20	1.2	11.77

### 三、黏滞性

流体内部质点间或流层间因相对运动而产生内摩擦力(内力)以反抗相对运动的性质, 称为黏滞性。此内摩擦力称为黏滞力。

为了说明流体的黏滞性, 现以流体在管中流动为例, 如图 1-1 所示。当流体在管中缓慢流动时, 紧贴管壁的流体质点黏附在管壁上, 流速为零。位于管轴上的流体质点, 离管

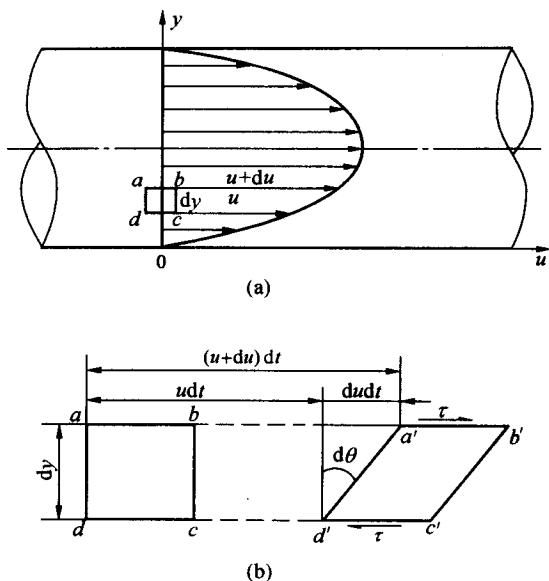


图 1-1 流体质点的直角变形速度

内摩擦力写成数学表达形式为

$$F \propto A \frac{du}{dy}$$

或

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

式 (1-6) 称为牛顿内摩擦定律。若以  $\tau$  代表单位面积上的内摩擦力, 则

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

为了更好地理解黏滞性对流体流动的影响, 下面分析式 (1-7) 中各项的物理意义。

(1)  $\frac{du}{dy}$ ——速度梯度, 它表示速度沿垂直于速度方向  $y$  的变化率, 单位为  $s^{-1}$ 。

如图 1-1a 所示, 在垂直于速度方向的  $y$  轴上, 任取一边长为  $dy$  的流体微小矩形分离体  $abcd$ , 将其放大, 见图 1-1b。由于微小分离体下表面的速度  $u$  小于上表面的速度  $(u+du)$ 。经过  $dt$  时间后, 下表面所移动的距离  $udt$ , 小于上表面所移动的距离  $(u+du)dt$ 。因而微小分离体  $abcd$  变形为  $a'b'c'd'$ 。即两流层间的垂直连线  $ad$  及  $bc$ , 在  $dt$  时间中变化了角度  $d\theta$ 。由于  $dt$  很小, 因此  $d\theta$  也很小, 则

$$d\theta \approx \tan d\theta = \frac{du dt}{dy}$$

故

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\theta}{dt}$$

可见, 速度梯度就是直角变形速度。这个直角变形速度是在切应力的作用下发生的, 所以也称剪切变形速度。因为流体的基本特征是具有流动性, 在切应力的作用下, 只要有充

壁的距离最远, 受管壁的影响最小, 因而流速最大。介于管壁和管轴之间的流体质点, 将以不同的速度向右移动, 它们的速度将从管壁至管轴线, 由零增加至最大的轴心速度。图 1-1a 就是黏性流体在管中缓慢流动时, 流速  $u$  随垂直于流速方向  $y$  而变化的函数关系图, 即  $u=f(y)$  的函数关系曲线, 称为流速分布图。由于各流层的速度不相同, 因而各质点间便产生了相对运动, 从而产生内摩擦力以抗拒相对运动。

### 1. 牛顿内摩擦定律

经过无数的试验得出了有规律的结论, 即在流体作剪切流动时, 内摩擦力 (或黏滞力)  $F$  的大小: ①与两流层间的速度差 (即相对速度)  $du$  成正比; ②与流层间距离  $dy$  成反比; ③与流层的接触面积  $A$  的大小成正比; ④与流体的种类和温度有关。

分的时间让它变形，它就有无限变形的可能性。因而只能用直角变形速度来描述它的剪切变形的快慢。因此，牛顿内摩擦定律也可以理解为切应力与剪切变形速度成正比。

(2)  $\tau$ ——切应力，单位为Pa。切应力 $\tau$ 不仅有大小，还有方向。以变形后微小分离体 $a'b'c'd'$ 为例，上表面 $a'b'$ 上面的流层运动较快，有带动较慢的 $a'b'$ 流层前进的趋势，因此作用于 $a'b'$ 面上的切应力 $\tau$ 的方向与运动方向相同。下表面 $c'd'$ 下面的流层运动较慢，有阻碍较快的 $c'd'$ 流层前进的趋势，故作用于 $c'd'$ 面上的切应力 $\tau$ 的方向与运动方向相反。对于相接触的两个流层来讲，作用在不同流层上的切应力，必然是大小相等，方向相反的。

应当指出，内摩擦力虽然是流体抗拒相对运动的性质，但它不能从根本上制止流动的发生。因此，流体的流动性，不因有内摩擦力的存在而消失。当然，在流体质点间没有相对运动（在静止或相对静止状态）时，内摩擦力不表现出来。

(3)  $\mu$ ——绝对黏度或黏滞系数，单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。不同流体有不同的 $\mu$ 值，同一流体的 $\mu$ 值愈大，黏滞性愈强。当 $\frac{du}{dy}=1$ 时， $\tau=\mu$ 。所以， $\mu$ 的物理意义可以理解为单位速度梯度作用下的切应力，所以它反映了黏滞性的动力性质，因此 $\mu$ 也称动力黏度。

## 2. 黏性的物理量及影响因素

动力黏度 $\mu$ 是表征流体动力特性的黏度。在流体力学中，还常用到动力黏度 $\mu$ 与流体密度 $\rho$ 的比值，它是表征流体运动特征的黏度，称为运动黏度，用 $\nu$ 表示。即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-8)$$

因流体运动黏度值很小，工程上经常使用的单位有 $\text{cm}^2/\text{s}$ （称斯托克斯，简写St）或它的1/100（称厘斯，简写cSt）。如果考虑密度就是单位体积质量，则运动黏度 $\nu$ 的物理意义可以理解为单位速度梯度作用下的切应力对单位体积质量作用产生的阻力加速度。由于在 $\nu$ 的量纲中没有力的量纲，只具有运动学量纲，故称 $\nu$ 为运动黏度。流体流动性是运动学的概念，所以衡量流体流动性时应用运动黏度 $\nu$ 而不用动力黏度 $\mu$ 。

常用不同温度下，水和空气的黏度列于表1-2和表1-3中。

表1-2 水在不同温度下的物理性质

温度/ $^{\circ}\text{C}$	重度 $\gamma/$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	密度 $\rho/$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	动力黏度 $\mu/$ ( $10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	运动黏度 $\nu/$ ( $10^{-6}\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	表面张力 $\chi/$ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	汽化压强 $p_v/$ Pa (绝对)	弹性系数 $E/$ $10^{-6}\text{kPa}$
0	9.805	999.8	1.781	1.785	0.0756	0.61	2.02
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	0.0749	0.87	2.06
10	9.804	999.7	1.307	1.306	0.0742	1.23	2.10
15	9.798	999.1	1.139	1.139	0.0735	1.70	2.15
20	9.789	998.2	1.002	1.003	0.0728	2.34	2.18
25	9.777	997.1	0.890	0.893	0.0720	3.17	2.22
30	9.764	995.7	0.798	0.800	0.0712	4.24	2.25
40	9.730	992.2	0.653	0.658	0.0696	7.38	2.28
50	9.689	988.0	0.547	0.553	0.0679	12.33	2.29

续表

温度/°C	重度 $\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	密度 $\rho$ / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	动力黏度 $\mu$ / ( $10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ )	运动黏度 $\nu$ / ( $10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	表面张力 $\chi$ / ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	汽化压强 $p_v$ / Pa (绝对)	弹性系数 $E$ / $10^{-6} \text{kPa}$
60	9.642	983.2	0.466	0.474	0.0662	19.92	2.28
70	9.584	977.8	0.404	0.413	0.0644	31.16	2.25
80	9.530	971.8	0.354	0.364	0.0626	47.34	2.20
90	9.466	965.3	0.315	0.326	0.0608	70.10	2.14
100	9.399	958.4	0.282	0.294	0.0589	101.33	2.07

表 1-3 标准大气压下空气在不同温度下的物理性质

温度/°C	密度 $\rho$ / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	重度 $\gamma$ / ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$ )	动力黏度 $\mu$ / ( $10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$ )	运动黏度 $\nu$ / ( $10^{-5} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
-40	1.515	14.86	1.49	0.98
-20	1.395	13.68	1.61	1.15
0	1.293	12.68	1.71	1.32
10	1.248	12.24	1.76	1.41
20	1.205	11.82	1.81	1.50
30	1.165	11.43	1.86	1.60
40	1.128	11.06	1.90	1.68
60	1.006	10.40	2.00	1.87
80	1.000	9.81	2.09	2.09
100	0.948	9.28	2.18	2.31
200	0.747	7.33	2.58	3.45

从表 1-2 及表 1-3 中还可看出水和空气的黏滞系数随温度变化的规律是不同的, 水的黏滞性随温度升高而减小, 空气的黏滞性随温度升高而增大。这是因为通常情况下, 形成流体黏性的因素有两个方面, 一是流体分子间的引力在流体微团相对运动时形成的黏性; 二是流体分子的热运动在不同流速流层间的动量交换所形成的黏性。对于气体, 分子间距离很大, 分子间的引力非常微小, 而分子的热运动强烈, 所以形成气体黏性的主要因素是分子的热运动。对于液体, 分子距较小, 分子间的引力较大, 而分子的热运动较弱, 所以形成液体黏性的主要因素是分子间的引力。所以, 当温度升高时, 分子的热运动加强, 分子距增大, 分子间的引力减小, 气体的黏性增大, 液体的黏性减小; 反之亦然。

通常情况下, 压强对流体的黏性影响不大, 可认为流体的动力黏度只随温度变化而变化。但是在高压作用下, 气体和液体的动力黏度都将随压强的升高而增大。

流体的黏度不能直接测量, 往往是通过测量其他物理量, 借助有关公式的计算得到的。由于测量原理、测量方法的不同, 测量的物理量也不相同。采用的测量方法有管流法、落球法和旋转法等。

工业上常用仪器来测定流体相对黏度, 再换算出运动黏度。例如, 采用测定原理比较

简单的恩氏黏度计来测定液体的黏度。其测定方法是将被测液体装入恩氏黏度计的圆筒中，加热至一定温度（通常为50℃）并保持恒温；让液体靠自重从圆筒底部直径为2.8mm的中心小孔流出，记录全部流出所需的时间 $t$ ；再测取20℃相同体积的蒸馏水从该孔全部流出的时间 $t_0$ 。被测液体的恩氏黏度为

$$^{\circ}E = \frac{t}{t_0} \quad (1-9)$$

恩氏黏度与运动黏度的换算关系为

$$\nu = \left( 0.0732^{\circ}E - \frac{0.0631}{^{\circ}E} \right) \times 10^{-4} \quad (1-10)$$

应当指出，牛顿内摩擦定律只适用于一般流体，它对某些特殊流体是不适用的。为此，将满足牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体，如水和空气等均均为牛顿流体。而将特殊流体称为非牛顿流体，如血浆、泥浆、污水、油漆和高分子溶液等。本书只研究牛顿流体。对非牛顿流体，可参阅有关的专门著作。

[例1-1] 在图1-2a中，气缸内壁的直径 $D=12\text{cm}$ 、活塞的直径 $d=11.96\text{cm}$ ，活塞的长度 $l=14\text{cm}$ ，活塞往复运动的速度为 $1\text{m/s}$ ，润滑油液的 $\mu=0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，试问作用在活塞上的黏滞力为多少？

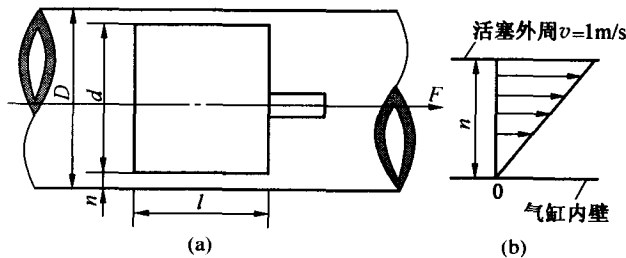


图1-2 活塞运动的黏性阻力

[解] 因黏性作用，黏附在气缸内壁的润滑油层速度为零，黏附在活塞外沿的润滑油层与活塞速度相同，即 $v=1\text{m/s}$ 。因此，润滑油层的速度由零增至 $1\text{m/s}$ ，油层间因相对运动产生切应力，故用 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ 计算。该切应力乘以活塞面积，就是作用于活塞上的黏滞力 $F$ 。

可将间隙 $n$ 放大，绘出该间隙中的速度分布图1-2b。由于活塞与气缸的间隙 $n$ 很小，速度分布图近似认为是直线分布。故

$$\frac{du}{dy} = \frac{v}{n} = \frac{100}{\frac{1}{2} \times (12 - 11.96)} = 5 \times 10^3 (1/\text{s})$$

将以上数值代入公式，得

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = 0.1 \times 5 \times 10^3 = 5 \times 10^2 (\text{N}/\text{m}^2)$$

接触面积

$$A = \pi dl = \pi \times 0.1196 \times 0.14 = 0.053 (\text{m}^2)$$

$$F = A\tau = 0.053 \times 5 \times 10^2 = 26.5 (\text{N})$$



#### 四、压缩性和膨胀性

流体在压强一定情况下温度升高、体积膨胀、密度减小的性质，称为流体的膨胀性。流体在温度一定情况下压强增大、体积缩小、密度增大的性质，称为流体的压缩性。

##### 1. 流体的压缩性

流体的压缩性大小，一般用体积压缩系数 $\beta_p$ 来表示。它是在一定温度下，单位压强增量引起的体积变化率。

设体积为 $V$ 的流体，密度为 $\rho$ ，当压强增加 $d p$ 时，密度增加 $d \rho$ ，体积减小 $d V$ ，体积变化率为 $d V / V$ ，则 $d V / V$ 与 $d p$ 的比值称为流体的体积压缩系数 $\beta_p$ ，即

$$\beta_p = - \frac{1}{V} \frac{d V}{d p} \quad (1-11)$$

$\beta_p$ 值愈大，则流体的压缩性也愈大。流体被压缩时，其质量并不改变，即

$$d m = d(\rho V) = \rho d V + V d \rho = 0$$

所以

$$d \rho / \rho = - d V / V$$

故体积压缩系数又可以表示为

$$\beta_p = \frac{1}{\rho} \frac{d \rho}{d p} \quad (1-12)$$

工程上还常用流体的弹性模量来表征流体的压缩性，它是体积压缩系数 $\beta_p$ 的倒数，以 $E$ 表示。即

$$E = \frac{1}{\beta_p} = - V \frac{d p}{d V} = \rho \frac{d p}{d \rho} \quad (1-13)$$

表1-4列出了水在温度为 $0^{\circ}\text{C}$ 时，不同压强下的体积压缩系数。

表1-4 水的压缩系数  
( $0^{\circ}\text{C}$ 时)

压强 / (at)	5	10	20	40	80
$\beta_p / \text{Pa}$	$0.538 \times 10^{-9}$	$0.536 \times 10^{-9}$	$0.531 \times 10^{-9}$	$0.528 \times 10^{-9}$	$0.515 \times 10^{-9}$

##### 2. 流体的膨胀性

流体的膨胀性大小，一般用体积膨胀系数 $\beta_T$ 来表示。它是在一定压强下，单位温升引起的体积变化率。

设体积为 $V$ 的流体，密度为 $\rho$ ，当温度增加 $d T$ 时，密度减小 $d \rho$ ，体积增加 $d V$ ，体积变化率为 $d V / V$ ，则 $d V / V$ 与 $d T$ 的比值，称为流体的体积膨胀系数 $\beta_T$ ，即

$$\beta_T = \frac{1}{V} \frac{d V}{d T} \quad (1-14)$$

$\beta_T$ 值愈大，则流体的膨胀性也愈大。体积膨胀系数也可表示为

$$\beta_T = - \frac{1}{\rho} \frac{d \rho}{d T} \quad (1-15)$$

##### 3. 气体与液体的区别

液体的压缩性和膨胀性很小，一般工程问题中可以忽略不计。如从表1-2看出压强每