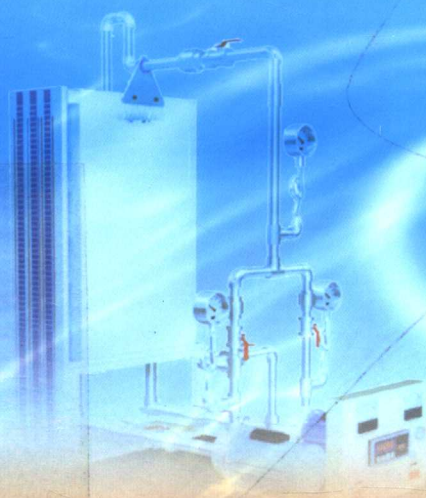




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工程流体力学

汪 楠 陈桂珍 主编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

TB126/39

2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工程流体力学

汪楠 陈桂珍 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书共七章,介绍了流体静力学、流体动力学的基本概念及所遵循的基本规律和力学基本方程,结合实际逐步讨论了简化后的工程常用的管流、非牛顿液体的概念及流动,最后介绍了气体管流基础。本书在编写中注重理论与实际相结合,既考虑理论的系统性,又突出石油与天然气行业的特殊性及理论应用的广泛性。

本书作为高校教材,适用于高职高专院校石油工程技术类专业和应用技术本科及普通本科院校的相关专业,也可供有关技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/汪楠,陈桂珍主编.

北京:石油工业出版社,2007.8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5021-6164-4

I. 工…

II. ①汪…②陈…

III. 工程力学:流体力学—高等学校—教材

IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 101100 号

工程流体力学

汪楠 陈桂珍 主编

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 12.5

字数: 302 千字 印数: 1—3000 册

定价: 18.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

本书是根据 2006 年 4 月, 由石油工业出版社组织、在重庆科技学院召开的《工程流体力学》教材编写会议纪要精神, 结合教育部教改试点方案精神及石油与天然气开采专业、石油钻井工程技术专业、石油与天然气储运技术专业、城市燃气输配专业教学要求编写的。

本书以培养学生工程技术应用能力为指导思想, 以基本知识、基本理论和基本技能为主要内容, 贯彻少而精的原则, 理论推导从简, 组织内容既考虑到其自身的科学性和系统性, 又强调针对性和应用性。在理论叙述上力求深入浅出, 条理清楚, 内容尽量结合石油与天然气工业的实际, 以适应相关特点, 文字通俗易懂。每章都有一定量的例题、思考题和习题, 便于教学、自学。其中加“*”号部分为根据层次、学时等具体情况选学的内容。

本书适用于石油与天然气开采、钻井工程技术、石油与天然气储运技术、城市燃气输配等专业; 也可供各类涉及管道输送工程的技术人员参考。

全书共分七章, 考虑到理论连续性、完整性, 附录部分包含了部分理论(数学)延展、推导, 中英文人名、名词对照, 及部分流体力学实验目的、要求、流程等, 这是本教材的又一特点。

本书由汪楠、陈桂珍主编, 李智勇、孟士杰为副主编。全书编写分工为: 绪言由汪楠编写, 第一章由孟士杰编写, 第二章由尹爱东、刘秀云、李伟编写, 第三章由陈桂珍、郑洪涛编写, 第四章由汪楠编写, 第五章由雷西娟编写, 第六章由李智勇编写, 第七章由梁平、徐春碧编写, 附录由汪楠、王岚编写。

经过几番的审核, 我们尽量寻找出书中的错误和不足, 对其进行了修改。但由于编者水平有限, 在内容选择、叙述、文字等方面难免仍然存在不当或错误之处, 恳请读者批评指正。

编 者
2007 年 3 月

绪 言

一、工程流体力学的研究对象

工程流体力学是应用力学的一个分支，是一门宏观力学。它研究流体平衡和运动的基本规律，以及流体与固体的相互作用力，用以分析解决工程的实际问题。通常认为物质以固体、液体、气体三种状态存在，流体包含液体和气体。

从学科上看属于这一范畴的有理论流体力学、工程流体力学、水力学、空气动力学、气体力学等。随着科学技术的发展，还产生了气象流体力学、泥浆流变学、磁流体力学、生物流体力学等学科。

工程流体力学以物理学为基础，以力学为依据，以数学、科学实验及计算机为工具，研究流体的平衡和流动规律。

工程流体力学是一门实用的工程科学，有比较完整的体系，它不但可以独立地解决一些工程实际问题，而且可以为学习多种工程专业课打下必要的基础。

工程流体力学广泛应用于石油工业、水利水电、给排水、航空、船舶工程、动力机械、化学工业、环保工程、气象学等领域。

本书主要结合石油及天然气开采、储运、钻井、燃气输配等有关石油工程涉及的水力现象和问题，从理论上作初步的论述，并结合工程实际列举了例题和习题，以提高分析和解决问题的能力。

二、流体力学的发展简况

流体的典型代表是水。对流体的研究，最早开始于农田水利。人类为了生存，在治河防洪、农田灌溉、河道航运等方面与自然斗争。我国秦代李冰父子设计建造的四川都江堰工程具有相当高的科学水平。隋代大运河工程，至今为人称颂。公元前 250 年阿基米得发表的“论浮体”促进了航海事业的发展。到了 17 世纪，托里拆利提出孔口泄流定律，帕斯卡提出压强传递定律，牛顿提出液体内部摩擦定律等，建立了部分理论。18 世纪，英国的产业革命促进了科技的发展，流体力学伴随其他科学也有了较大进展。伯努利能量方程、欧拉平衡和运动微分方程给流体力学奠定了理论基础。19 世纪，在纳维-斯托克斯、泊松等人的努力下，形成了粘性流体力学理论和旋涡理论，雷诺、达西等人也发现了两种流态并进行了水力摩阻的实验研究。20 世纪，儒柯夫斯基、普朗特、卡门等人对空气动力学研究，促进了航空事业的发展。近代流体力学更进一步划分出许多分支，如计算流体力学、多相流体力学、生物流体力学等。随着科学技术的飞速发展，电子计算机的广泛应用，流体力学的研究又进入了一个新的发展阶段，增加了研究的深度和广度，内容将不断充实和完善。

三、流体力学在石油工业中的地位和作用

油、气、水都属于流体。石油行业从油气开采的注水、压裂、酸化，油气集输、计

量、储存、运输，到钻井的泥浆循环系统、涡轮钻具、高压喷射钻井工艺等都涉及流体力学的许多问题。如：分析流体在管道内的流动规律，压力、阻力、流速和流量的关系，据以设计管径，校核管材强度、油罐强度，布置管线以及选择泵的大小和类型，设计泵的安装位置及管、罐、泵方面的问题；估计容器、油槽车、油罐的装卸时间；了解气蚀、防止水击、理解计量用水力仪表的原理等方面内容；在“开辟稠油第二战场”中的稠油降凝、降粘、减阻、冷输；在“开发西部”中的油气混输研究等等。所有这些，都要求从事石油工艺技术的科学工作者必须具备工程流体力学的知识，以便在工程建设和管理中，更好地发挥作用。

学习工程流体力学，不仅要掌握油、气、水运动的规律，更重要的是将这些规律与计算机相结合，改进工程的设计与管理，加快科学研究和技术改造，使石油工业赶超世界先进水平。

目 录

第一章 流体主要物理性质	1
第一节 流体的概念.....	1
第二节 流体的基本物理性质.....	1
第三节 作用在流体上的力.....	9
第四节 流体的各种模型	10
思考题	11
习题	12
第二章 流体静力学	13
第一节 流体静压力及其特性	13
* 第二节 流体静平衡微分方程	16
第三节 重力作用下的流体平衡（水静力学基本方程式）	20
第四节 几种质量力作用下的流体平衡	28
第五节 作用在平面上的流体总压力	31
第六节 作用在曲面上的流体总压力	34
第七节 物体在液体中的潜浮原理	38
思考题	40
习题	42
第三章 流体动力学	46
第一节 研究流体运动的方法	46
第二节 流体运动的基本概念	48
第三节 连续性方程式	50
第四节 流体运动的伯努利方程式	51
第五节 伯努利方程式的应用	56
第六节 流速与流量的测量	66
* 第七节 流体的动量方程式及其应用	70
思考题	77
习题	78
第四章 流体阻力与水头损失	85
第一节 管路中流动阻力产生的原因及分类	85
第二节 两种流态及转化标准	87
第三节 圆管层流分析	90
第四节 圆管中的紊流	92
第五节 沿程阻力系数实验分析及水头损失的计算	95
第六节 管路局部水头损失的计算	99
思考题.....	102
习题.....	102

第五章 压力管路和孔口、管嘴的水力计算	105
第一节 概述.....	105
第二节 简单长管的水力计算.....	107
第三节 复杂管路的水力计算.....	113
第四节 沿程均匀泄流管路	120
第五节 短管的水力计算.....	122
第六节 定水头孔口和管嘴泄流.....	125
第七节 变水头泄流.....	128
第八节 压力管路中的水击.....	131
思考题.....	135
习题.....	135
第六章 非牛顿流体的流动	139
第一节 非牛顿流体的流变性.....	139
第二节 塑性流体.....	143
第三节 幂律流体.....	150
思考题.....	151
习题.....	151
第七章 气体运动	153
第一节 一维定常流动基本方程.....	153
第二节 滞止参数、音速、马赫数.....	158
第三节 气体流动的计算.....	161
思考题.....	165
习题.....	165
附录	166
附录 A 部分理论(数学公式)推导	166
附录 B 流体力学常见人名中外文对照	182
附录 C 专业词汇中、英文对照	183
附录 D 工程流体力学部分实验基本原理.....	187
参考文献	192

第一章

流体主要物理性质

流体的平衡和运动规律除了与外部作用力有关外，更主要的是决定于流体的内在属性即流体的物理性质。因此，在研究流体的力学规律之前，应首先了解流体的概念及其主要物理性质。

第一节 流体的概念

从宏观上讲，物质以固体、液体和气体三种形式存在，而其中的液体和气体都属于流体。

由于固体的分子排列紧密，分子之间的作用力大，因此，固体不仅具有一定的体积，而且还能保持一定的形状。从力学性质来看，固体具有抵抗压力、拉力和切力的能力，因而在一定的外力作用下，通常只发生较小的变形，而且到一定程度后变形就停止。

流体与固体相比，由于分子排列松散，分子间引力较小，分子运动较剧烈，这就决定了流体具有区别于固体的特性：流体不能保持一定的形状、不能抵抗拉力和切力的作用，当受到微小切力作用时，将发生连续不断的变形，即通常所说的流动。我们把凡是没有一定的形状（形状决定于容器形状）、易于流动的物质称为流体。

流体一方面具有区别于固体的共同特性，另一方面同属于流体的液体和气体之间的性质又有所不同。液体分子间的作用力比气体间的作用力大，分子排列较紧密，液体的分子距和分子有效直径差不多是相等的。当对液体加压时，由于分子距稍有缩小，就会出现强大的分子斥力来抵抗外力。因此，液体不易被压缩，或者说压缩性很小，以至液体虽然没有一定的形状，却具有一定的体积，并能承受很大的压力。又由于分子引力作用，液体有力求自身表面积收缩到最小的特性，所以在容器里只能占据一定的体积，而在上部形成自由分界面。

气体与液体相比，由于气体分子距很大，其分子引力很小。例如常温常压下，空气分子距为 $3 \times 10^{-7} \text{ cm}$ ，其分子有效直径的数量级为 10^{-8} cm 。可见分子距比分子有效直径大得很多。因此当分子距缩小很多时，才会出现分子斥力，故通常称气体为可压缩流体。又因气体分子距很大，分子引力很小，这就使气体既没有一定形状，也没有一定体积。因而一定量气体进入较大容器内，由于分子不断地运动，结果使气体均匀充满容器，而不能形成自由表面。

第二节 流体的基本物理性质

一 密 度

对于流体来讲，流体单位体积内所具有的质量称为流体的密度，以 ρ 表示。即：

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

式中： ρ ——流体的密度， kg/m^3 ；

V ——流体的体积， m^3 ；

m ——流体的质量， kg 。

二 相对密度

1. 液体的相对密度

液体的相对密度是液体的密度与标准大气压下、温度为 4°C 时的纯水的密度之比值。常用 d 来表示，即：

$$d = \frac{\rho}{\rho_{\text{水}}} \quad (1-2)$$

式中： d ——液体的相对密度。

由于纯水在 4°C 时密度最大，此时它的密度是 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ，因此选择 4°C 时纯水的密度作为参照标准。表 1-1 为温度从 0°C 变到 100°C 的过程中水的密度变化情况。

表 1-1 标准大气压下，水在不同温度时的密度

温度, $^\circ\text{C}$	0	4	20	40	60	80	100
密度, kg/m^3	999.8	1000.0	998.2	992.2	983.2	971.8	958.4

某些常见的液体的相对密度见表 1-2。

表 1-2 某些常见液体的相对密度

液体	相对密度	温度, $^\circ\text{C}$	液体	相对密度	温度, $^\circ\text{C}$
蒸馏水	1.00	4	航空汽油	0.65	15
海水	1.02~1.03	4	轻柴油	0.83	15
重原油	0.92~0.93	15	润滑油	0.89~0.92	15
中原油	0.88~0.90	15	重油	0.89~0.94	15
轻原油	0.86~0.88	15	沥青	0.93~0.95	15
煤油	0.79~0.82	15	丙三醇	1.26	0
航空煤油	0.78	15	汞（水银）	13.6	0
普通汽油	0.70~0.75	15	乙醇（酒精）	0.79~0.80	15

2. 气体的相对密度

气体的相对密度与液体不同，在石油工业上一般是指气体的密度与标准状态下（ 0°C ，1 标准大气压）空气的密度之比值。

【例 1-1】 若某油箱中有体积为 5.0m^3 的油所受的重力为 41313N ，试确定这种油的密度和相对密度。

解：根据牛顿第二定律及式（1-1）可得：

$$G = mg = \rho Vg$$

则流体的密度为：

$$\rho = \frac{G}{Vg} = \frac{41313}{5.0 \times 9.81} = 842 (\text{kg/m}^3)$$

流体的相对密度为：

$$d = \frac{\rho}{\rho_{\ast}} = \frac{842}{1000} = 0.842$$

三 流体的压缩性和膨胀性

1. 压缩性

在温度不变的条件下，流体的体积随压力增大而缩小的性质称为流体的压缩性。

流体压缩性的大小，用体积压缩系数 β_p 表示，它代表压力增加 1Pa 时所引起的体积相对变化量，即：

$$\beta_p = -\frac{\frac{dV}{V}}{dp} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-3)$$

式中：V——流体的体积， m^3 ；

dV ——流体体积的变化量， m^3 ；

dp ——流体压力的变化量，Pa；

β_p ——流体的体积压缩系数， Pa^{-1} 。

因为 dV 与 dp 的变化方向相反，即压力增加时体积减小，故式 (1-3) 中加一负号，以便系数 β_p 永为正值。水的 β_p 值如表 1-3 所示。

表 1-3 水的体积压缩系数

$p, 10^5 \text{ Pa}$	5	10	20	40	80
$\beta_p, 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$	0.529	0.527	0.521	0.513	0.505

从上表可以看出，压力为 $5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 情况下，每增加 10^5 Pa 时，水的体积只改变万分之 0.529，可见水的压缩性是很小的，其它液体压缩性也是很小的。因此，在工程实际中，一般不考虑液体的压缩性，把液体看作是不可压缩的。

体积压缩系数的倒数叫做体积弹性系数，用 E_0 表示，即：

$$E_0 = \frac{1}{\beta_p} \quad (1-4)$$

显然 E_0 的单位为 Pa。流体力学中常用体积弹性系数 E_0 来衡量流体的压缩性， E_0 越大，流体越不易被压缩。

气体的压缩性要比液体的压缩性大得多，这是由于气体无一定的形状、无一定的体积，其密度随着温度和压力的改变将发生明显的变化。

2. 膨胀性

流体的体积不仅随压力变化,而且也随温度变化。在压力不变的条件下,流体的体积随温度升高而增大的性质称为流体的膨胀性。流体膨胀性的大小用体积膨胀系数 β_t 表示,它代表温度每增加 1°C 时所引起的体积相对变化量,即

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

式中: dt ——温度改变量, $^\circ\text{C}$;

β_t ——体积膨胀系数, $^\circ\text{C}^{-1}$ 。

实验表明,在 1 个大气压下,温度较低时 ($10\sim 20^\circ\text{C}$),温度每增加 1°C ,水的体积相对改变量仅为万分之 1.5;温度较高时 ($90\sim 100^\circ\text{C}$),也只改变万分之 7。所以在实际计算中,一般不考虑水的膨胀性。

表 1-4 给出了水的体积膨胀系数随压力和温度而变化的数值。

表 1-4 水的体积膨胀系数

$t, ^\circ\text{C}$ $p, 10^5 \text{ Pa}$	0~10	10~20	40~50	60~70	90~100
1	0.000014	0.000150	0.000422	0.000556	0.000719
100	0.000043	0.000165	0.000422	0.000548	0.000704
500	0.000149	0.000236	0.000429	0.000523	0.000661

【例 1-2】 体积为 5.0m^3 的水,在温度不变的条件下,压力从 $9.81\times 10^4 \text{ Pa}$ 增加到 $4.91\times 10^5 \text{ Pa}$,体积缩小了 1.0L ,求水的体积压缩系数 β_p 。

解: $dp = 4.91\times 10^5 - 9.81\times 10^4 = 39.3\times 10^4 \text{ (Pa)}$

$$dV = -1.0\text{L} = -1.0\times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$V = 5.0\text{m}^3$$

根据式 (1-3) 得:

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} = \frac{1}{5.0} \times \frac{1.0\times 10^{-3}}{39.3\times 10^4} = 5.09\times 10^{-10} \text{ (Pa}^{-1}\text{)}$$

【例 1-3】 某小型采暖系统,有 50.0kg 的水。温度从 40°C 升高到 80°C ,试求水的体积的变化量及水的体积膨胀系数 β_t 值。

解:由式 (1-1) 得:

$$V = \frac{m}{\rho}$$

查表 1-1 得,在 40°C 时,水的密度为 $\rho_1 = 992.2\text{kg/m}^3$; 80°C 时,水的密度为 $\rho_2 = 971.8\text{kg/m}^3$,则水的体积增量为:

$$\begin{aligned} dV &= V_2 - V_1 = \frac{m}{\rho_2} - \frac{m}{\rho_1} = m \left(\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_1} \right) \\ &= 50.0 \times \left(\frac{1}{971.8} - \frac{1}{992.2} \right) \\ &= 1.06 \times 10^{-3} \text{ (m}^3\text{)} \end{aligned}$$

而

$$V_1 = \frac{m}{\rho_1} = \frac{50.0}{992.2} = 5.04 \times 10^{-2} \text{ (m}^3\text{)}$$

所以

$$\beta_1 = \frac{1}{V_1} \frac{dV}{dt} = \frac{1}{5.04 \times 10^{-2}} \times \frac{1.06 \times 10^{-3}}{80 - 40} = 5.26 \times 10^{-4} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$$

流体的粘滞性

粘滞性是指当流体内部质点发生相对运动时而产生切向阻力的性质，也称粘性。流体是由分子组成的物质，当它以某一速度流动时，其内部分子间存在着吸引力。此外，流体分子和固体壁之间有附着力作用。分子间的吸引力和流体分子与壁面间的附着力都属于抵抗流体运动的阻力，而且是以摩擦形式表现出来。其作用是抵抗流体内部的相对运动，从而影响着流体的运动状况。由于粘性存在，流体在运动中克服摩擦力必然要做功，所以粘性也是流体中发生机械能量损失的根源。

1. 牛顿内摩擦定律

为了定量确定流体的粘性，可以取两块相互平行的平板，其间充满流体。下板固定不动，上板以 u_0 速度平行下板运动时，由于流体的粘性，两板间流体便发生不同速度的运动状态：粘附在动板下面的流体层将以 u_0 的速度运动，愈往下速度愈小，直到附在固定板流体层的速度为零。其速度分布按直线规律变化，如图 1-1 所示。

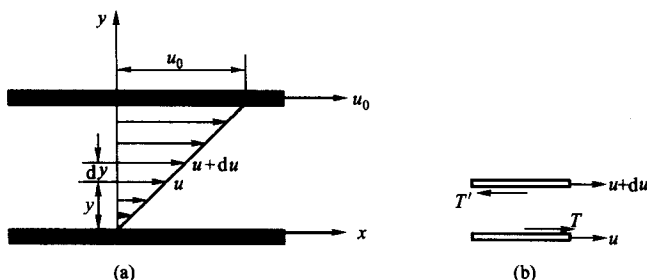


图 1-1 液体粘滞性实验示意图

以上事实说明：运动较慢的流体层，都是在较快的流体层带动下才运动。同时，快层也受到慢层的阻碍，而不能运动得更快。这样，相邻流体层发生相对运动时，快层对慢层产生一个切力 T ，使慢层加速。根据作用力与反作用力原理，慢层对快层有一个反作用力 T' ，使快层减速，它是阻止运动的力，称为阻力。切力和阻力是大小相等、方向相反的一对力，分别作用在两个流体层的接触面上。这一对力是在流体内部产生的，所以也叫内摩擦力。

为了确定内摩擦力，牛顿在 1686 年根据试验提出液体内摩擦定律，其内容如下：取无限薄的流体层进行研究，坐标为 y 处流速为 u ，坐标为 $y+dy$ 处流速为 $u+du$ ，显然在厚度为 dy 的薄层中速度梯度为 du/dy 。液层间内摩擦力 T 的大小与液体性质有关，并与速度梯度 du/dy 和接触面积 A 成正比，而与接触面上压力无关，即

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

符合这种内摩擦定律的流体称为牛顿型流体，否则称为非牛顿型流体。

设 τ 代表单位面积上的内摩擦力, 即粘性切应力, 则

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

式中: T ——相邻两流层接触面上的内摩擦力, N;

A ——两流层的接触面积, m^2 ;

$\frac{du}{dy}$ ——速度梯度, 对于圆管常写成 $\frac{du}{dr}$, $1/s$;

μ ——比例系数, 也称为流体的动力粘度, 其大小与流体的性质及温度有关, $Pa \cdot s$ 。

式 (1-7) 称为牛顿内摩擦定律。式中 $\pm$ 号反映了 $\frac{du}{dy}$ 的变化关系。为了保证 T 或 τ 永为正值, 当 $\frac{du}{dy} > 0$ 时取正号, 当 $\frac{du}{dy} < 0$ 时取负号。当 $\frac{du}{dy} = 0$ 时, 则 $T = \tau = 0$, 这表明, 处于静止状态下的流体不呈现内摩擦力或粘滞力。换言之, 只有流层在相对运动状态下, 流体才呈现粘滞力。

2. 粘度

粘度的物理意义: 在 $\frac{du}{dy}$ 一定时, 比例系数 μ 的大小反映了切应力 τ 的大小, 亦即反映了流体粘滞性的大小。另一方面, 当 $\frac{du}{dy} = 1$ 时, 在数值上 μ 等于 τ , 因此, 也可以说, 当速度梯度等于 1 时, 在数值上 μ 就等于接触面上的切应力, 因而可用 μ 来度量流体的粘滞性。 μ 大的流体粘滞性大, μ 小的流体粘滞性小。

在国际单位制中, τ 的单位是 N/m^2 , 而 $\frac{du}{dy}$ 的单位是 $1/s$, 故 μ 的单位为 $N \cdot s/m^2$ 即 $Pa \cdot s$ 。在物理单位制中, μ 的单位是 P (泊), $1P = 0.1Pa \cdot s$ 。因为泊单位有时用之过大, 常用泊的百分之一来表示, 叫做厘泊, 符号为 cP, $1P = 100cP$ 。

在流体力学的分析计算中, 常出现动力粘度 μ 与流体密度 ρ 的比值, 称为运动粘度, 以 ν 表示之, 即

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

其国际单位为 m^2/s ; 物理单位是 cm^2/s , 也叫做斯, 符号为 St。斯的百分之一称为厘斯, 符号为 cSt, $1St = 100cSt$ 。因为 ν 具有运动学量纲, 故称为运动粘度。

3. 温度对粘度的影响

温度对粘度的影响比较显著。温度升高时液体的 μ 值降低, 而气体的 μ 值反而加大。这是由于液体的分子间距较小, 相互吸引力起主要作用, 当温度升高时, 间距增大, 吸引力减小; 而气体分子间距较大, 吸引力影响很小, 根据分子运动理论, 分子的动量交换率因温度升高而加剧, 因而使切应力也随之增加。

例如水, 当 $t = 0^\circ C$ 时, $\nu_{\text{水}} = 1.794 \times 10^{-6} m^2/s$, 而当 $t = 30^\circ C$ 时, $\nu_{\text{水}} = 0.803 \times 10^{-6} m^2/s$; 空气, 当 $t = 0^\circ C$ 时, $\nu_{\text{空气}} = 1.319 \times 10^{-5} m^2/s$, 当 $t = 30^\circ C$ 时, $\nu_{\text{空气}} = 1.607 \times 10^{-5} m^2/s$ 。

最后指出, 液体的粘度几乎与压力的大小无关, 即使在高压系统中, 液体的 μ 值变化也很小。因此, 在工程上一般不考虑压力对 μ 值的影响。表 1-5 为水和空气在不同温度下的动力粘度和运动粘度值。

表 1-5 水和空气在不同温度下的动力粘度和运动粘度值

温度 ℃	水		空气 (标准大气压下)	
	动力粘度 μ cP	运动粘度 ν cSt	动力粘度 μ cP	运动粘度 ν cSt
0	1.792	1.792	0.0172	13.7
5	1.519	1.519	—	—
10	1.308	1.308	0.0178	14.7
15	1.140	1.141	—	—
20	1.005	1.007	0.0183	15.7
25	0.894	0.897	—	—
30	0.801	0.804	0.0187	16.6
40	0.656	0.661	0.0192	17.6
50	0.549	0.556	0.0196	18.6
60	0.469	0.477	0.0201	19.6
70	0.406	0.415	0.0204	20.6
80	0.357	0.367	0.0210	21.7
90	0.317	0.328	0.0216	22.9
100	0.284	0.296	0.0218	23.6

4. 粘度的测定方法

粘度的测定方法有两种，一是直接测定 μ 、 ν 值，因此 μ 和 ν 又统称为绝对粘度。如毛细管粘度计和旋转粘度计就是用来测定绝对粘度的。二是用恩氏粘度计测定液体的相对粘度，然后用经验公式将恩氏粘度 $^{\circ}E$ 换算成运动粘度。在工程上常采用此法。

恩氏粘度 $^{\circ}E$ 是一种相对粘度。它是指 200mL 的液体，从恩氏粘度计中流出所需要的时间 t_1 (s) 与等量的 20℃ 的纯水从同一恩氏粘度计中流出的时间 t_2 (s) 之比，即

$$^{\circ}E = \frac{t_1}{t_2} \quad (1-9)$$

一般情况下， t_2 约为 50s。恩氏粘度 $^{\circ}E$ 是一无单位的纯数字。当 $^{\circ}E > 2$ 时，它与运动粘度 ν 换算的经验公式如下：

$$\nu = 0.0731^{\circ}E - \frac{0.0631}{^{\circ}E} (\text{cm}^2/\text{s}) \quad (1-10)$$

【例 1-4】 如图 1-2 所示，汽缸内径 $D=190\text{mm}$ ，活塞外径 $d=189.5\text{mm}$ ，活塞长 $L=100\text{mm}$ ，活塞与汽缸壁的间隙中，充满粘度 $\mu=0.12\text{Pa}\cdot\text{s}$ 的润滑油，试计算当活塞运动速度 $v=1.5\text{m/s}$ 时，活塞上所受的摩擦力 F 。

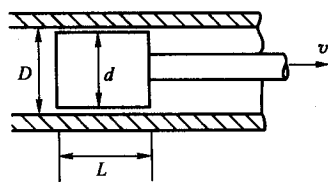


图 1-2

$$\text{解: (1) } \tau = \mu \frac{du}{dy} = 0.12 \times \frac{1.5}{0.5 \times (0.19 - 0.1895)} = 720 (\text{N/m}^2)$$

$$(2) F = A\tau = 3.14 \times 0.1895 \times 0.1 \times 720 = 42.86 \text{ (N)}$$

答：活塞上所受到的摩擦力 $F = 42.86\text{N}$ 。

● 表面张力和毛细管现象

在液体内部，液体分子同时受到周围其它分子对它的吸引力，各个方向上的吸引力大小相等、方向相反，处于平衡状态。但是在液体与大气相接触的自由面上，由于液体分子间的引力大于气体对液体分子的引力，造成两侧分子引力不平衡，使自由表面上液体分子具有被拉向液体内部的倾向，使液体的自由表面拉紧收缩，形成面积最小的形状。这种存在于流体表面的拉力称为表面张力。

表面张力的现象是很常见的。例如，树叶上的露珠、滴在玻璃板上的水银，大家可以看到液滴呈球形，这都是表面张力作用的结果。表面张力除产生在液体和气体相接触的自由表面外，在不混合的液体间以及液体与固体之间的分界面附近的分子都将受到两种介质的分子引力作用，因此，在分界面上都存在表面张力。

表面张力的大小可用表面张力系数 σ 来描述。如果在液面上任取一条长为 L 的线段，则张力的作用表现在：线段两侧液面上以一定的拉力 f 相互作用，力的方向恒与线段垂直，大小与线段长 L 成正比，即

$$f = \sigma L$$

比例系数 σ 就是液体的表面张力系数，表示液体表面单位长度上所受的拉力，单位为 N/m 。不同的液体，表面张力系数不同；相同的液体在不同的温度下，表面张力系数也不同，所有液体的表面张力都随着温度的上升而下降。表 1-6 给出了几种液体在 20°C 时的表面张力系数。

表 1-6 几种液体在 20°C 时与空气接触的表面张力系数

液 体	水	酒 精	煤 油	水 银	原 油	甘 油
表面张力系数 σ , N/m	0.0728	0.0223	0.0270	0.4714	0.0234	0.0631

由上表可见，表面张力系数值很小，在一般工程问题中可以忽略不计。只有在某些特殊情况下才考虑表面张力的作用。

在毛细管中，这种张力可以引起显著的液面上升和下降，即所谓毛细管现象。因此，在用某些玻璃管制成的水力仪表中，必须注意到表面张力的影响。当玻璃管插入水（或其它能够润湿管壁的液体）中时，由于水的内聚力小于水同玻璃间的附着力，水将润湿玻璃管的内外壁面。在内壁面由于管径小，水的表面张力使水面向上弯曲并升高，如图 1-3 所示。当玻璃管插入水银（或其它不润湿管壁的液体）中时，由于水银的内聚力大于水银同玻璃间的附着力，水银不能湿润玻璃，水银面向下弯曲，表面张力将使玻璃管内的液柱下降，如图 1-4 所示。

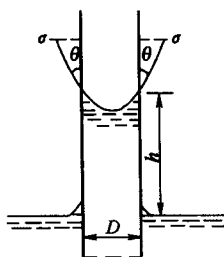


图 1-3

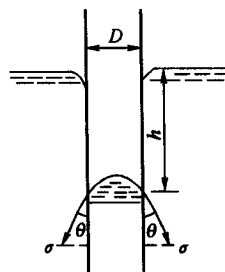


图 1-4

现以水为例推导毛细管中液面升高的数值。如图 1-3 所示，表面张力拉动液柱向上，直到表面张力在垂直方向上的分力与所升高液柱的重量相等时，液柱才平衡下来。如果 D 为管径， θ 为液体与玻璃的接触角， ρ 为液体密度， h 为液柱上升高度，则管壁圆周总表面张力在垂直方向的分力为 $\pi D \sigma \cos \theta$ ，其方向向上。上升液柱重量为 $\rho g \frac{\pi}{4} D^2 h$ ，其方向向下。此二者相等，有：

$$\pi D \sigma \cos \theta = \rho g \frac{\pi}{4} D^2 h$$

所以：

$$h = \frac{4 \sigma \cos \theta}{\rho g D} \quad (1-11)$$

可见，液体上升高度与管子直径成反比，并与液体种类及管子材料有关。在 20°C 时，水与玻璃的接触角 $\theta = 8^\circ \sim 9^\circ$ ，水银与玻璃接触角 $\theta = 139^\circ$ 。

【例 1-5】 在 20°C 的水中垂直插有内径为 10mm 的玻璃管。求水在玻璃管中上升的高度 h 。（ 20°C 的水与玻璃管的接触角 $\theta = 8^\circ$ ）

解： 20°C 时，水的表面张力系数 $\sigma = 0.0728\text{N/m}$ ，水的密度 $\rho = 998.2\text{kg/m}^3$ ，根据式 (1-11) 得：

$$h = \frac{4 \sigma \cos \theta}{\rho g D} = \frac{4 \times 0.0728 \times \cos 8^\circ}{998.2 \times 9.81 \times 10^{-3}} = 2.94(\text{mm})$$

第三节 作用在流体上的力

流体无论处于运动或平衡状态，都受到各种力的作用。这些力若按其物理性质不同，可分为重力、惯性力、弹性力和粘滞力等；若按力的作用方式不同，又可将这些力分为质量力和表面力两大类。

质 量 力

质量力作用于流体的每一质点上，其大小与流体质量成正比。

在一般情况下，流体受地球引力的作用，因此，流体的所有质点都受重力作用，即

$$G = mg \quad (1-12)$$

式中： G ——流体所受的重力；

m ——流体的质量；

g ——重力加速度。

当流体处于变速直线运动或曲线运动状态时，惯性力的大小等于流体质量与加速度的乘积，其方向与加速度的方向相反。惯性力包括匀加速直线运动的直线惯性力 I 以及绕某轴作等角速度旋转运动时的离心惯性力 R ，分别满足下面二式：

$$I = m \cdot a \quad (1-13)$$

$$R = m \omega^2 r \quad (1-14)$$

式中： m ——流体的质量；

a ——直线加速度。

$\omega^2 r$ ——向心加速度；