

高等学校适用教材



# 工程流体与粉体力学基础

王奎升 编著



中国计量出版社

高等学校适用教材

# 工程流体与粉体力学基础

王奎升 编著

中国计量出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

工程流体与粉体力学基础/王奎升编著. —北京: 中国计量出版社, 2002.10

高等学校适用教材

ISBN 7 - 5026 - 1675 - 6

I. 工… II. 王… III. ①工程力学: 流体力学—高等学校—教材②粉体—力学—高等学校—教材 IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 063529 号

## 内 容 提 要

本书含流体力学与粉体力学两大部分, 共 10 章, 涉及流体及粉体力学的基本概念、基本原理、研究方法和工程应用 4 个方面。主要内容有流体的力学性质, 流体静力学, 流体运动学与动力学基础, 管内流动流体阻力和水头损失, 压力管路的水力计算, 一元不稳定流, 粉体颗粒的几何形态与粒群的分散和聚集特性, 粉体力学, 颗粒的分级与分离, 颗粒的流体输送等内容。

本书兼有工程流体力学教材和粉体加工技术教材的特点, 内容层次分明, 概念阐述清晰, 例题说明基本原理和工程应用方法, 每章末均选编一定的思考题和习题, 以利于教学和各章基本内容的理解与掌握。

本书是“过程装备与控制工程”专业教材, 也可供高等学校石油、化工、轻工、选矿、冶金、建筑、能源、机械及相关专业作为教材或教学参考书, 还可供相关专业的科研、工程技术、管理技术人员参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

E-mail jlfxb@263.net.cn

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

\*

787 mm × 1092 mm 16 开本 印张 15 字数 360 千字

2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月第 1 次印刷

\*

印数 1—3000 定价: 25.00 元

# 前 言

我国自 20 世纪 50 年代初设立化工设备与机械（现为“过程装备与控制工程”）专业以来，该专业在我国化学工业及相关工业的建设中起了重要的作用。随着近代科学技术的发展，新增的内容也越来越多，如何选取有关内容，改革教学方法，面向企业，着重培养学生理论联系实际，解决工程实际问题的能力，已成为教材建设中的一个重要环节。

工程流体与粉体力学属于力学的一个分支。它研究流体及粉体的平衡和运动的基本规律以及气体、液体、粉体与固体的相互作用的力学特点，用以分析解决工程设计和使用中的实际问题。从学科上看，属于此范畴的有理论流体力学、工程流体力学和水力学。理论流体力学侧重于用数学分析方法进行理论探讨，研究流体受力及其宏观运动规律；水力学侧重于用物理分析和实验方法进行实用计算，而工程流体与粉体力学则趋向于两者的互相结合，从实用角度，对工程实际中涉及的问题建立相应的理论基础。

作为“过程装备与控制工程”专业的主要课程之一，工程流体与粉体力学的任务是使本专业的学生能熟练掌握流体力学和粉体力学的基本理论及其在工程实际问题中的应用，因为在石化、矿冶、制药、食品等行业中的粉体制备、输运与排除（除尘）中，经常碰到并需要研究解决的问题，只有掌握了有关理论，才能为分析研究过程装备中的流体与粉体流动规律及其相关的传递过程，为研究设计并开发新型高效的过程装备奠定必要的基础。但是，到目前为止，还没有一本既包含工程流体力学，又包含粉体力学的教材，该书即是编者根据这一教学需要而做的一次尝试。

本书共分两大部分。第一部分是前六章，主要介绍工程流体力学的基本概念、基本原理、分析方法和工程应用等；第二部分是后四章，主要介绍工程粉体力学的基本概念、基本原理、研究方法和工程应用等。各章均选编了一定的思考题和习题，以利于教学和各章基本内容的理解与掌握。

本书主要为“过程装备与控制工程”专业教材，也可供高等学校石油、化工、轻工、选矿、冶金、建筑、能源、机械及相关专业作为教材或教学参考书，还可供相关专业的科研、工程技术、管理技术人员作参考。

本书由王奎升教授主编。其中第 5 章由陈家庆副教授编写，其余各章均由王奎升教授编写，并负责全书统稿。

本书编写过程中，承蒙北京化工大学徐鸿教授对全书的初稿作了审阅，并提出了许多宝贵意见，在此谨表衷心感谢。另外，笔者还向本书中所引用文献的作者致以深切的谢意。本书的出版得到了北京化工大学“化新教材建设基金”的赞助，此外，中国计量出版社徐焱编辑对本书出版付出了辛勤劳动，在此也一并表示感谢。

由于编者水平所限，加之时间仓促，书中疏漏和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者  
2002 年 5 月

# 目 录

<b>第一章 流体的力学性质</b> .....	(1)
1.1 流体的概念 .....	(1)
1.2 流体的主要物理性质 .....	(2)
1.3 牛顿流体和非牛顿流体 .....	(7)
思考题.....	(8)
习 题.....	(8)
<b>第二章 流体静力学</b> .....	(10)
2.1 作用在流体上的力 .....	(10)
2.2 流体平衡微分方程 .....	(13)
2.3 某些流体静力学的基本问题 .....	(16)
思考题 .....	(26)
习 题 .....	(26)
<b>第三章 流体运动学与动力学基础</b> .....	(29)
3.1 概 述 .....	(29)
3.2 描述流体运动的两种方法 .....	(30)
3.3 流体运动的基本概念 .....	(33)
3.4 连续性方程 .....	(36)
3.5 理想流体运动微分方程及伯努利方程 .....	(38)
3.6 实际流体总流的伯努利方程 .....	(40)
3.7 系统与控制体 .....	(47)
3.8 稳定流的动量方程和动量矩方程 .....	(49)
思考题 .....	(52)
习 题 .....	(52)
<b>第四章 管内流动流体阻力和水头损失</b> .....	(54)
4.1 管路中流动阻力产生的原因及分类 .....	(54)
4.2 两种流态及转化标准 .....	(55)
4.3 实际流体运动微分方程——纳维 - 斯托克斯方程 .....	(56)
4.4 圆管内的流动分析 .....	(59)

---

4.5 圆管内紊流的理论分析 .....	(62)
4.6 特型管道内的流体流动 .....	(71)
4.7 局部水力摩阻 .....	(74)
思考题 .....	(76)
习 题 .....	(76)
<b>第五章 压力管路的水力计算 .....</b>	<b>(77)</b>
5.1 管路特性曲线 .....	(77)
5.2 长管的水力计算 .....	(78)
5.3 短管的水力计算 .....	(83)
5.4 孔口泄流 .....	(84)
思考题 .....	(85)
习 题 .....	(85)
<b>第六章 一元不稳定流 .....</b>	<b>(87)</b>
6.1 一元不稳定流基本方程 .....	(87)
6.2 水击现象 .....	(90)
6.3 水击压力的计算 .....	(92)
6.4 变水头泄流及排空 .....	(94)
思考题 .....	(95)
习 题 .....	(96)
<b>第七章 粉体颗粒的几何形态与粒群的分散和聚集特性 .....</b>	<b>(97)</b>
7.1 气态非均一系的分类 .....	(97)
7.2 颗粒的粒度 .....	(97)
7.3 颗粒形状与分布 .....	(100)
7.4 颗粒粒度和形状的测量方法 .....	(110)
7.5 粉体颗粒的分散 .....	(116)
7.6 颗粒粒群的聚集 .....	(123)
思考题 .....	(129)
习 题 .....	(129)
<b>第八章 粉体力学 .....</b>	<b>(130)</b>
8.1 粉体的摩擦特性 .....	(130)
8.2 粉体压力计算 .....	(138)
8.3 粉体的重力流动 .....	(140)
8.4 粉体的压缩流动 .....	(145)

---

8.5 粉体颗粒的流体力学 .....	(146)
思考题 .....	(161)
<b>第九章 颗粒的分级与分离 .....</b>	<b>(162)</b>
9.1 概 述 .....	(162)
9.2 颗粒的分级 .....	(166)
9.3 颗粒的分离 .....	(183)
思考题 .....	(208)
<b>第十章 颗粒的流体输送 .....</b>	<b>(209)</b>
10.1 概 述 .....	(209)
10.2 气固两相流的输送理论 .....	(212)
10.3 单粒子自由悬浮运动理论 .....	(220)
10.4 粒群均匀悬浮运动理论 .....	(222)
思考题 .....	(229)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(230)</b>

# 第一章 流体的力学性质

## 1.1 流体的概念

根据现代的科学观点,物质可分为5种状态:固态、液态、气态、等离子态和凝聚态,其中,固、液、气三态是自然界和工程技术领域中常见的。在工业生产中经常会碰到固体颗粒或液滴在气流中进行输送、反应或燃烧,以完成整个产品的制造或合成过程的问题,这种颗粒流动通常称为多相流动。这里的“相”有两种含义,一种是泛指气、固、液相,另一种是指气—固或液—固流动过程中,颗粒相是由不同直径的固粒(粉体粒)或液滴所组成。

从力学的角度看,固态物质与液态和气态物质有很大的不同:固体具有确定的形状,同时具有抵抗压力、拉力和切力的3种能力;同时,固体在确定的切应力作用下将产生确定的、不随时间改变的剪切应变和变形,而液体或气体则没有固定的形状,且在切应力作用下将产生连续不断的变形——流动。因而液体和气体又通称为流体。应用物理学基本原理研究流体受力及其运动规律的学科称为流体力学。流体力学作为宏观力学的重要分支,与固体力学一样同属于连续介质力学的范畴。

从学科上看,属于此范畴的有理论流体力学、工程流体力学和水力学。前者侧重于用数学分析方法进行理论探讨,水力学侧重于用物理分析和实验方法进行实用计算,而工程流体及粉体力学则是两者互相结合,研究其平衡和运动的基本规律,以及流体与固体的相互作用的力学特点,从实用角度对工程实际中涉及的问题建立相应的理论基础,分析解决工程设计和使用中的实际问题。

流体是由分子构成的,根据热力学理论,这些分子(无论液体或气体)在不断地随机运动和碰撞,因此,到分子水平这一层,流体之间就总是存在间隙,其质量在空间的分布是不连续的,其运动在时间和空间上都是不连续的。到亚分子层次时(如原子核和电子),流体同样也是不连续的。流体按压缩性的大小分为气体和液体。气体极易压缩,亦称为可压缩流体;液体几乎不可压缩,称为不可压缩流体。

液体的分子距和分子有效直径差不多是相等的。对液体加压时,由于分子距稍有缩小,便会出现强大的分子斥力来抵抗外加压力。这意味着液体分子距在压力作用下很难缩小,因此,通常可以认为液体具有一定的体积,通常称为不可压缩流体。又由于分子引力作用,液体有力求自身表面面积收缩到最小的特性,所以在大容器里只能占据一定的体积,而在上部形成自由分界面,又称自由液面。

一般地,气体分子距很大,分子引力很小。例如,常温常压下,空气分子距为 $3 \times 10^{-7}$  cm,其分子有效直径的数量级为 $10^{-8}$  cm。因此,当分子距缩小很多时,才会出现分子斥力。所以通常称气体为可压缩流体。因为分子距很大,分子引力很小,这就使气体既没有一定的形状,也没有一定的体积。因而一定质量的气体进入较大容器内,由于分子不断运动,结果



使气体均匀充满容器，而不能形成自由表面。

流体力学研究的并不是个别分子的微观运动，而是研究由大量分子组成的宏观流体在外力作用下所引起的机械运动。因此，在流体力学中引入连续介质的假设，即认为流体质点是微观上充分大、宏观上充分小的分子团，它完全充满所占空间，没有空隙存在。这在应用上既方便，又有足够的精确性。因为在标准状态下， $1\text{mm}^3$  气体中有  $2.7 \times 10^{16}$  个分子， $1\text{mm}^3$  液体中有  $2.7 \times 10^{21}$  个分子，因此忽略分子间隙是有根据并可行的。把流体看成连续介质，在以后的讨论中就可以利用连续函数的解析方法来研究流体平衡和运动状态下有关物理参数之间的数量关系。需要指出的是，这一假设对大多数流体是适用的，但对于稀薄的气体，连续假设便不能适用，而必须考虑为不连续流体。

## 1.2 流体的主要物理性质

### 1.2.1 密度

惯性是物体要维持原有运动状态的物理性质。物体任何运动状态的改变都是受到外力作用产生加速度的结果。在一定外力作用下，物体的惯性越大，则加速度越小，亦即要使物体运动状态发生改变越难，或物体维持原有运动状态的能力越强。表征惯性的物理量是质量，质量越大，惯性也越大，其运动状态越难改变。

单位体积流体内所具有的质量称为密度，以  $\rho$  表示，单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。对于均质流体，其体积为  $V$ ，质量为  $M$ ，则

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

对于非均质流体，根据连续介质的假设，在流体中任取一体积为  $\Delta V$  的微元，其质量为  $\Delta M$ ，则

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} = \frac{dM}{dV} \quad (1-1b)$$

### 1.2.2 重度

物体之间相互具有吸引力，该引力称为万有引力，其作用是企图改变物体原有运动状态，而使其相互接近。在流体运动中，仅考虑地球对流体的引力。表征地球对某物体引力大小的物理量就是该物体所受的重力，亦即该物体的重量。单位体积流体所具有的重量称为重度，以  $\gamma$  表示，单位为  $\text{N}/\text{m}^3$ 。对于均质流体，其体积为  $V$ ，重量为  $G$ ，则

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2a)$$

对于非均质流体，根据连续介质的假设，则  $\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV}$  (1-2b)

在气体中，常用比容这一物理量。它是单位重量流体的体积，以  $v$  表示，单位为  $\text{m}^3/\text{N}$ 。

比容和重度成倒数关系。即  $v = \frac{1}{\gamma}$  (1-3)

### 1.2.3 流动性

流体没有固定的形状，其形状取决于限制它的固体边界；流体各个部分之间易发生相对运动，即流体的流动性。流体在受到很小的切应力时，就要发生连续的变形，直到切应力消失为止。受到切应力作用而发生连续变形的流体称为运动流体。反之，称为静止流体。切应力是流体处于运动状态的充分必要条件。

### 1.2.4 可压缩性和膨胀性

#### (1) 可压缩性

流体不仅形状容易发生变化，而且在压力作用下，其体积也会发生改变。这就是流体的可压缩性。

流体的可压缩性通常用体积压缩系数  $\beta_p$  来表示。其定义为：在一定温度下，单位压力增量产生的体积相对减少率。即

$$\beta_p = \frac{dV/V}{dp} \quad (1-4)$$

式中  $V$  ——原有体积， $m^3$ ；

$dV$  ——体积改变量， $m^3$ ；

$dp$  ——压力改变量，Pa；

$\beta_p$  ——体积压缩系数， $Pa^{-1}$ 。

水的体积压缩系数如表 1—1 所示。

表 1—1 水的体积压缩系数

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

由上表可知，水的压缩性是很小的，其他液体的压缩性也是很小的。因此，通常情况下，液体都被作为不可压缩流体来处理，其密度被视为常数，这使对液体的研究得到大大简化。只有当液体的温度和压力变化特别大（如水中爆炸和高压液压系统）时，才需要考虑其可压缩性。

流体的可压缩性也可用  $\beta_p$  的倒数即体积弹性模量  $E_v$  来描述。

$$E_v = \frac{1}{\beta_p} = - \frac{dp}{dV/V} \quad (1-5)$$

$E_v$  的单位与压力单位相同。 $E_v$  的值大，表示流体的可压缩性小；反之，可压缩性大。

气体和液体的主要差别在于它们的可压缩性不同，因而有不同的流体力学表现。气体易于压缩，它的体积变化由状态方程来决定。气体的密度变化可以表示为

$$p = \rho RT \quad (1-6)$$

其中， $p$  为压力， $T$  为绝对温度， $R$  为气体常数，对于空气  $R = 287.06 J / (kg \cdot K)$ 。温度和压力的变化均会显著影响气体的可压缩性。气体在高速流动时，它的体积变化不能忽略不计，要作为可压缩流体来处理。

因此，理论上，所有流体都是可压缩的。在研究具体问题，流体是否看成可压缩的判

断依据主要是可压缩性对流体运动影响的大小，或者问题研究所要求的近似程度。

## (2) 膨胀性

在压力不变的条件下，流体温度升高时，其体积增大的性质称为膨胀性。膨胀性大小用体积膨胀系数  $\beta_t$  表示。其定义为：在一定压力下，温度每增加  $1^\circ\text{C}$  时所发生的体积相对变化量，即

$$\beta_t = \frac{dV}{V dt} \quad (1-7)$$

式中  $dt$  —— 温度改变量， $^\circ\text{C}$ ；

$\beta_t$  —— 体积膨胀系数， $^\circ\text{C}^{-1}$ 。

实验指出，在一个大气压下，在温度较低时 ( $10 \sim 20^\circ\text{C}$ )，温度每增加一度，水的体积相对改变量仅为  $1.5 \times 10^{-4}$ ；温度较高时 ( $90 \sim 100^\circ\text{C}$ )，也只改变  $7 \times 10^{-4}$ 。所以在实际计算中，一般不考虑液体的膨胀性。

## 1.2.5 粘滞性

粘性指的是当流体受到外部剪切力作用而发生相对运动时，其内部相应要产生抵抗变形的切向阻力的性质。粘性是流体具有的一个重要性质。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的。其作用是抵抗液体内部的相对运动，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作功，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

为了定量地描述流体的粘性，可以设想有两块相互平行的平板  $A$  和  $B$ ，其间充满流体。当下板  $B$  固定不动，上板  $A$  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，速度分布按直线规律变化，见图 1-1。

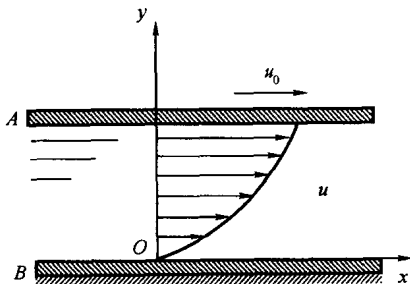


图 1-1 牛顿内摩擦定律说明简图

从以上事实说明：运动较慢的流体层，都是在较快的流体层带动下才运动的。同时，快层也受到慢层的阻碍，而不能运动的更快。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，使慢层加速。根据作用与反作用原理，慢层对快层有一个反作用力，使快层减速，它是阻止运动的力，称阻力。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 年根据实验提出并经后人加以验证的

液体内摩擦定律：流体层之间单位面积的内摩擦力与流体剪切变形速率即速度梯度成正比。说明如下：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

$$T = \pm \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-8)$$

符合内摩擦定律的流体称为牛顿流体，否则称为非牛顿流体。

设  $\tau$  代表单位面积上的内摩擦力，即粘性切应力（也叫牛顿切应力），则

$$\tau = \frac{T}{A} = \pm \mu \frac{du}{dy} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 中  $\mu$  是与流体种类、温度有关的系数，它是代表流体粘滞性的物理量，反映流体内摩擦力的大小，称为动力粘性系数，或简称粘度。式 (1-9) 中  $\pm$  号是为使  $T$ ， $\tau$  永为正值而设的，即当速度梯度  $du/dy > 0$  时取正号；另一方面，当  $du/dy < 0$  时取负号。由方程式可知，当  $du/dy = 0$  时，则  $T = \tau = 0$ ，就是指流体质点间没有相对运动，即流体处于静止或相对静止状态时，流体内也不存在内摩擦力。

## (2) 粘性系数或粘度

粘性系数  $\mu$  的物理意义：在相同的  $du/dy$  情况下， $\mu$  值表征流体粘性大小；另一方面，当  $du/dy = 1$  时，在数值上  $\mu$  等于  $\tau$ 。因此，也可以说，当速度梯度等于 1 时，在数值上  $\mu$  就等于接触面上的切应力。

在国际单位制中， $\tau$  的单位是  $N/m^2$ ，而  $du/dy$  在单位是  $1/s$ ，故  $\mu$  的单位为  $N \cdot s/m^2$  或写成  $Pa \cdot s$ 。

在流体力学的分析计算中，常把动力粘性系数  $\mu$  与流体密度  $\rho$  的比值，称为运动粘度，以  $\nu$  表示之，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-10)$$

其国际单位为： $m^2/s$ ；物理单位是  $cm^2/s$ 。

因为  $\nu$  没有力的要素，仅有运动学量纲，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  $\mu$  值降低，而气体  $\mu$  值反而加大。原因是液体的分子间距较小，相互吸引。当温度升高时，间距增大，吸引力减小。气体分子间距较大，吸引力影响很小，但根据分子运动理论，分子的动量交换率因温度的升高而加剧，因而使切应力也随之增加。

### 1.2.6 表面张力

由于液体的分子吸引力极小，一般来说，它只能承受压力，不能承受张力。但是在液体与气体相接触的自由液面上，由于气体分子的内聚力和液体分子的内聚力有显著的差别，使自由液面上液体分子有向液体内部收缩的趋势，这种趋势表明，液体表面各部分之间存在相互作用的拉力，使其表面总处于张紧状态。如空气中的自由液滴总是呈球形。液体表面的这种拉力就称为表面张力。单位长度上的表面张力称为表面张力系数，以  $\sigma$  表示。

表面张力除产生在液体和气体相接触的自由表面外，在液体与固体相接触的表面上，也会产生附着力。

因表面张力系数  $\sigma$  值不大，在工程上一般可以忽略不计。但是，在毛细管中，这种张力可以引起显著的液面上升和下降，即管中的液位与管外的液位有明显的高度差。这种现象称为毛细现象。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。事实上，不仅对细玻璃管有毛细现象，对狭窄的缝隙和纤维及粉体物料构成的多孔介质也有毛细现象。因此，广义地说，毛细现象是由液体对固体表面的润湿效应和液体表面张力所决定的一种现象。与所接触的液体一起产生毛细现象的固体壁面可以通称为毛细管。毛细现象是微细血管内血液流动、植物根茎内营养和水分输送、多孔介质流体流动的基本研究对象之一。润湿效应是液体和固体相互接触时的一种界面现象。所谓润湿，是指液体与固体接触时，前者要在后者表面上四处扩张；而不润湿则是指液体在固体表面不扩张而收缩成团。如图 1—2 所示，当玻璃管插入水中时，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。液体进入毛细管后，自由液面要形成弯月面。如果润湿，弯月面为下凹，且毛细管内的液面将高于管外的液面；反之，当玻璃管插入水银（或其他不润湿管壁的液体）中时，由于水银的内聚力大于水银同玻璃间的附着力，水银不能润湿玻璃，水银面向下弯曲，表面张力将使玻璃管内的液柱下降，其弯月面上凸，管内液面低于管外液面。

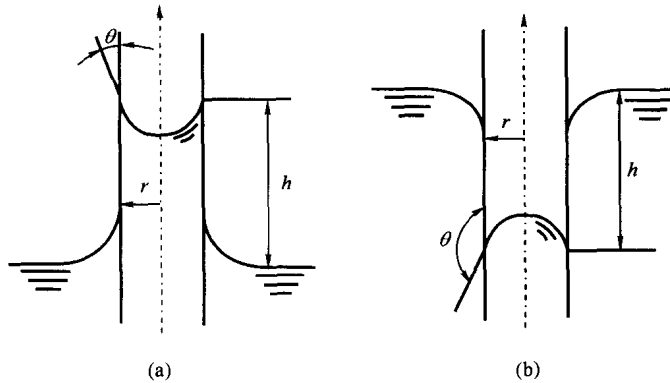


图 1—2 毛细现象

现以水为例推导毛细管中液面升高的数值。表面张力拉液柱向上，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，液柱就平衡下来。如果  $D$  为管的内直径， $\theta$  为液体与固体界面（玻璃）之间的接触角， $\gamma$  为液体重度， $h$  为液体上升高度，则管壁圆周上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  $\gamma \frac{\pi}{4} D^2 h$ ，这两个力达到平衡，则有

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

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。显然，液体能润湿管壁时， $\theta$  为锐角，反之， $\theta$  为钝角。 $\theta$  为钝角时， $h$  为负值，表明管内液面低于管外液面。

例 1—1：设有一根毛细管，其内径为 2mm，与水的接触角为  $20^\circ$ ，水在空气中的表面张

力系数为  $0.0730\text{N/m}$ ，若水的密度为  $1000\text{kg/m}^3$ ，试求水在毛细管中的上升高度。

$$\text{解: } h = \frac{4\sigma \cos\theta}{\gamma D} = \frac{4 \times 0.0730 \times \cos 20^\circ}{1000 \times 9.806 \times 0.002} = 13.99\text{mm}$$

在  $20^\circ\text{C}$  时，一般地，水与玻璃的接触角  $\theta = 8^\circ \sim 9^\circ$ ，水银与玻璃接触角  $\theta = 139^\circ$ 。

### 1.3 牛顿流体和非牛顿流体

式 (1—9) 牛顿切应力公式表明了流体内摩擦力与速度梯度之间的关系。事实上，对于任意流体，其内摩擦切应力总是速度梯度的单值函数。在物理意义上，该公式表明有一大类流体，其切应力与速度梯度呈线性关系，该类流体称为牛顿流体。反之，即切应力与速度梯度呈非线性关系，则该类流体称为非牛顿流体。

各种物质的切应力与速度梯度之间的关系如图 1—3 (a) 所示。其中，牛顿流体、假塑性流体和胀塑性流体 3 种物质受很小的切应力就会产生较大的剪切变形速率（速度梯度），且切应力—速度梯度曲线通过原点，因此将它们分类为不能抵抗切应力的真实流体；塑性流体能抵抗小的切应力，即速度梯度为 0 时，其切应力不为 0。宾汉（Bingham）理想塑性流体在切应力达到屈服应力之前无变形，超过屈服应力后切应力与变形速率成线性关系。塑性体和宾汉理想塑性体可以看成一半是固体一半是流体。

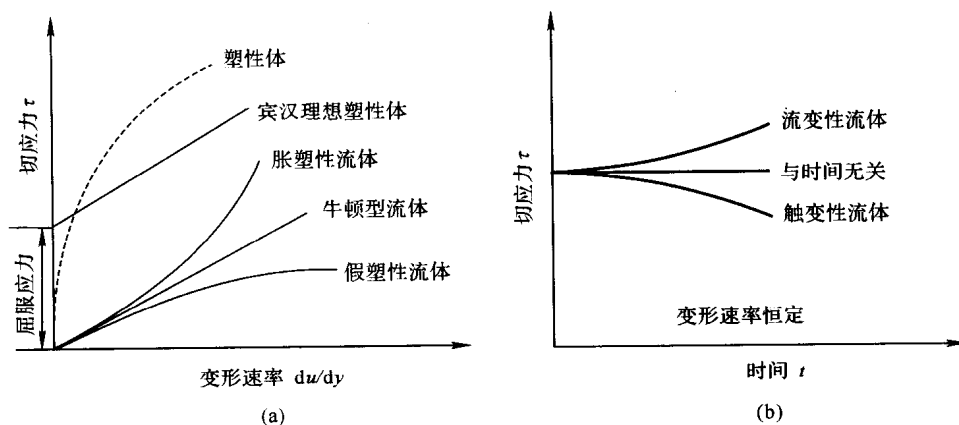


图 1—3 牛顿流体与非牛顿流体的粘度特性

假塑性流体的切应力—速度梯度曲线下凹，而胀塑性流体的则上凹。这表明，前者的斜率随着速度梯度增加而下降，因此又被称为剪切变稀流体（速度梯度增加会降低其粘性）；后者斜率随着速度梯度增加而增大，因此被称为剪切变稠流体（速度梯度增加将提高其粘性）。

图 1—3 (b) 表明了更复杂的一类非牛顿流体。这类流体的切应力在速度梯度保持恒定时要随时间变化。切应力随时间增加的流体称为流变性流体，反之则称为触变性流体。非牛顿流体主要是流变学的研究对象。

为了方便描述非牛顿流体，人们提出了广义的牛顿切应力公式

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (1-12)$$

系数  $\eta$  同样反映了流体的内摩擦特性，常常被称为广义的牛顿粘度。对于牛顿型流体，

$\eta$  当然就是粘度  $\mu$ ，属于流体的物性参数。对于非牛顿型流体，问题则变得复杂，正如图 1—3 中的曲线所表明的， $\eta$  不再是常数，它不仅与流体的物理性质有关，而且还与受到的切应力或剪切速率有关，即流体的流动情况要改变其内摩擦特性。人们提出了几个描述非牛顿型流体内摩擦特性的所谓“粘度函数”模型，如 Ostwald - de waele 的指数函数模型，Ellis 模型，以及 Carreau 模型等。

指数模型认为，非牛顿流体的粘度函数是速度梯度或剪切速率绝对值的一个指数函数，其表达式为

$$\eta = \eta_R \left| \left( \frac{du}{dy} \right)_R \right|^{n-1} \quad (1-13)$$

其中， $\left( \frac{du}{dy} \right)_R$  称为参考或相对剪切速率（速度梯度），数值上与剪切速率相等，无量纲。 $\eta_R$  反映流体的粘稠特性，也可以看成是当剪切速率为  $1\text{s}^{-1}$  时的流体粘度，取粘度的量纲。

从上式可以得到各种流体的定义：

- ①  $n = 1$  时， $\eta = \eta_R = \mu$ ，为牛顿型流体；
- ②  $n < 1$  时，为假塑性或剪切变稀流体；
- ③  $n > 1$  时，为胀塑性或剪切变稠流体。

## 思考题

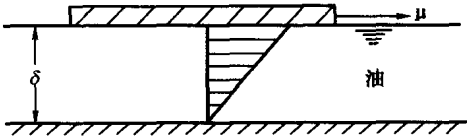
- 1—1 液体与气体有哪些不同性质？
- 1—2 密度、重度和相对密度的定义及其相互关系如何？
- 1—3 流体的压缩性和膨胀性的定义，温度和压力对其有何影响？
- 1—4 何谓流体的粘性？气体和液体的粘性有何区别，原因何在？
- 1—5 牛顿流体与非牛顿流体的区别？

## 习题

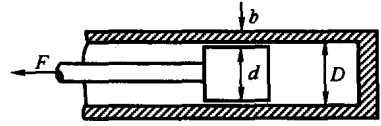
- 1—1 轻柴油在温度  $15^\circ\text{C}$  时相对密度为 0.84，求它的密度和重度。
- 1—2 容积  $5\text{ m}^3$  的水，温度不变，当压强增加  $10^5\text{ N/m}^2$  时容积减少  $1000\text{ cm}^3$ ，求该水的体积压缩系数  $\beta_p$  和体积弹性系数  $E$ 。
- 1—3 石油相对密度 0.89，粘度  $2.8 \times 10^{-4}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。求运动粘度为多少  $\text{m}^2/\text{s}$ ？
- 1—4 图示一块平板在油面上作水平运动，已知运动速度  $u = 1.5\text{ m/s}$ ，板与固定边界的距离  $\delta = 1\text{ mm}$ ，油的动力粘度  $\mu = 1.147\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，由平板所带动的油层的运动速度呈直线分布，

求作用在平板单位面积上的粘性阻力为多少？

1—5 如图所示活塞油缸，其直径  $D = 15 \text{ cm}$ ，活塞直径  $d = 11.96 \text{ cm}$ ，活塞长度  $L = 15 \text{ cm}$ ，油的  $\mu = 0.065 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，当活塞移动速度为  $0.5 \text{ m/s}$  时，试求拉回活塞所需的力  $F = ?$



题 1—4 图



题 1—5 图



## 第二章 流体静力学

流体静力学研究的是流体在静止状态下的平衡规律及其应用。

所谓静止是一个相对的概念。如果流体对地球没有相对运动，一般就称它们是处于静止状态。实际上，如果把参考坐标系放在其他星球上，地球本身亦处于运动中，则静止流体是随地球一起运动的。与这种情况类似，如果容器中的流体随容器在运动，而流体对容器没有相对运动，则对于固定在容器上的参考坐标系来说容器中的流体也是静止的，就称此种情况下的流体是处于相对静止或相对平衡。即静止流体是指对选定的坐标系无相对运动的流体。流体静力学是研究静止流体的力学性质，分析其各个物理量之间的相互关系的学科。

静止流体是相对于运动流体而言的。正如固体力学中的静力学分析一样，流体力学将静止流体的力学分析作为一个单独的体系来处理，具有两方面的意义。一是为后面的流体动力学奠定受力分析基础；二是流体静力学分析所采用的方法和得到的某些结果可直接应用于科学和工程实践。

### 2.1 作用在流体上的力

流体每一质点无论处于运动或平衡状态，都受到各种力。任意考察一流体团的受力状况，如图 2—1 所示的流体团。其所受外力可以分为两类：质量力和表面力。

#### 2.1.1 质量力

质量力是作用在流体上的非接触力，或称为远程力，如地球引力和运动惯性力等。质量力与流体的质量有关。在均质流体中，质量力也必然与受作用的流体的体积成比例，所以又称为体积力。设在密度为  $\rho$  的运动流体中，取一微元体  $\Delta V$ ，所受到的质量力为  $\Delta F$ ，单位质量流体所受的质量力  $f$  可定义为

$$f = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\rho \Delta V} \quad (2-1)$$

如流体的重力、流体作直线加速运动时所受的惯性力和作曲线运动时受的离心惯性力等，这些都是质量力（或体积力），其大小与流体质量成正比，且都作用在质量中心上。

除了上述力外，流体还可能受其他一些非接触力，如电场力和磁场力。这些力虽然与流体质量无直接关系，但在静力学分析中，仍然把它们称为质量力。

一般地，流体所受的质量力在不同空间位置 and 不同时刻是变化的，因此，单位质量力是时间和空间位置的函数

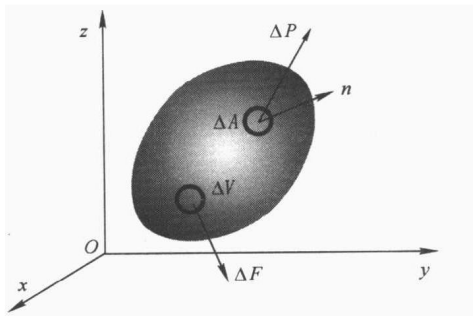


图 2—1 静止流体团受力分析