



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

材料工程基础

周勇敏 主编



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

材料工程基础

周勇敏 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本教材主要介绍“三传一反”的基本原理及其应用,包括相关设备的基本结构原理及相关性能。其内容包括:流体流动(动量传递)基本原理、流体输送设备构造原理及性能、热量传递原理及设备、质量传递原理、干燥原理及设备、燃烧原理及燃烧设备。

本教材紧密结合生产实际,注重对解决实际问题的分析方法介绍,可作为高等学校材料科学与工程类所有专业的本科教材,也可作为相关专业研究生及从事材料工程领域研究、设计和生产方面工作的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

材料工程基础/周勇敏主编. —北京:化学工业出版社, 2011.7

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

ISBN 978-7-122-11222-4

I. 材… II. 周… III. 工程材料-高等学校-教材 IV. TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第085071号

责任编辑:杨 菁

文字编辑:咎景岩

责任校对:顾淑云

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张21¼ 字数559千字 2011年6月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:39.00元

版权所有 违者必究

前 言

材料是人类赖以生存和发展的物质基础。人们的衣食住行无不涉及材料。在材料的加工、制备、生产和应用过程中涉及许多物理和化学过程。材料品种繁多,包括有机高分子材料、无机非金属材料、金属材料、复合材料等,其生产加工过程各不相同,即使同一种材料也存在不同的生产过程,然而无论何种材料的生产过程均离不开一些共性的工程原理,包括材料生产加工过程中流体的流动、热量的传递、质量的传递等。对这些具有共性的基本原理进行研究是材料工程原理需要解决的基本问题,也是这门学科的基本内容。

《材料工程基础》是材料及相关专业的一门必修专业基础课。该课程是在掌握高等数学及相关物理和化学知识的基础上为进一步学习工程性专业课程必须奠定的基础,是由基础课向工程科学的专业课过渡的入门课程。

本课程的主要任务是介绍“三传一反”基本原理及其应用,包括相关设备的基本结构原理及相关性能。其内容包括:流体流动(动量传递)基本原理、流体输送设备构造原理及性能、热量传递原理及设备、质量传递原理、干燥原理及设备、燃烧原理及燃烧设备。

由于本课程的内容与实际生产过程和生活密切相关,因此在学习时应紧密联系实际生产过程,注重对日常生活的观察和思考,对各个基本原理所涉及的物理或化学现象注重分析其影响因素及相互之间的关系。同时,注意学习时逐步掌握各种分析问题和解决问题的思路及方法。

由于本书内容涉及面广,所需学时较多,因此在实际教学过程中可以根据材料科学与工程学科下不同的二级学科专业将其中部分内容作为选学内容。本教材各章节建议学时安排如下:第一章流体力学基础(22学时);第二章流体输送机械(10学时);第三章热量传递原理(22学时);第四章质量传递原理(6学时);第五章干燥原理与技术(10学时);第六章燃烧原理与技术(10学时)。

由于作者水平所限,时间仓促,教材中疏漏甚至错误之处在所难免,请广大师生在实际教学中批评指正。

编者
2011年3月

目 录

第一章 流体力学基础	1	二、相似特征数	71
引言	1	三、模型律	74
一、流体的主要物理性质	1	四、量纲分析	77
二、作用在流体上的力	7	思考题	81
三、描述流体的力学模型	9	习题	82
第一节 流体静力学	9	参考文献	86
一、流体静压强及其特征	10	第二章 流体输送机械	87
二、流体压强的表示方法与度量单位	11	引言	87
三、流体静力学基本方程	12	第一节 离心式泵与风机基础理论	88
四、流体静力学基本方程的应用（压强及 压差测量）	15	一、离心式泵与风机的结构及工作原理	88
五、流体对固体表面的作用力*	17	二、离心式泵与风机的性能参数	88
六、流体的相对平衡*	21	三、离心式泵与风机的基本方程——欧拉 方程	89
第二节 一元不可压缩流体动力学基础	22	四、离心式泵与风机的性能曲线	93
一、描述流体运动的两种方法	22	第二节 相似原理在离心式泵与风机中的 应用	99
二、流体流动基本概念	23	一、离心式泵与风机相似条件	100
三、流体流动连续性方程	26	二、相似律与比转数	100
四、元流能量方程——元流伯努利方程	27	第三节 泵与风机的运行特性及工况调节	110
五、总流能量方程——总流伯努利方程	31	一、管路特性曲线	110
六、稳态流动总流动量方程*	37	二、泵与风机的工作点	110
第三节 流动阻力和能量损失	39	三、泵与风机的联合运行	111
一、流动阻力和能量损失的类型	39	四、泵与风机的工况调节	115
二、流体流动形态及其判定	41	第四节 泵的汽蚀现象及安装高度	117
三、圆管内流体层流运动沿程阻力损失	42	一、泵的汽蚀现象	117
四、圆管内流体紊流运动沿程阻力损失	43	二、泵的安装高度	117
五、非圆管内流体流动沿程阻力损失	48	第五节 泵与风机的选型	120
六、管道内流体局部阻力损失	49	第六节 其他类型的流体输送机械	122
七、减小阻力损失的措施	53	一、其他类型的泵	122
第四节 管路基础	54	二、其他类型的风机（压气机）	126
第五节 一元气体动力学基础*	57	思考题	130
一、基本概念	57	习题	131
二、理想气体一元稳态流动运动方程	59	参考文献	132
三、气体一元稳态流动连续性方程	61	第三章 热量传递原理	133
第六节 黏性流体力学基础*	65	引言	133
一、流体运动微分形式连续性方程	65	一、热量传递的研究方法	133
二、黏性流体运动微分方程式	66	二、热量传递的基本方式	133
三、黏性流体运动基本方程的求解	69	第一节 导热	136
第七节 流体流动相似原理及量纲分析	70	一、基本概念及基本定律	136
一、力学相似性原理	70		

二、导热微分方程	139	思考题	238
三、一维稳态导热	141	习题	238
四、多维稳态导热的求解*	148	参考文献	239
五、非稳态导热*	151	第五章 干燥原理与技术	240
第二节 对流换热	159	引言	240
一、对流换热概述	159	第一节 湿空气的性质	240
二、对流换热的数学描述	161	一、湿空气中水蒸气含量	241
三、对流换热准则方程	163	二、描述湿空气的温度	242
四、常见的强制对流换热	165	三、湿空气的其他性质	244
五、常见的自然对流换热	172	第二节 描述湿空气参数之间关系	245
第三节 辐射换热	175	一、湿空气状态参数之间的解析关系应用	246
一、热辐射的基本概念	175	二、湿空气的湿度图及其应用	246
二、热辐射的基本定律	178	第三节 湿空气状态变化的典型过程	250
三、黑体表面间的辐射换热与角系数	181	第四节 干燥过程的物料平衡和热量平衡	252
四、灰体表面间的辐射换热	185	一、干燥系统的组成	252
五、气体辐射与火焰辐射	190	二、物料平衡	253
第四节 综合传热与换热器	198	三、热量平衡	254
一、流体通过壁面间接传热	198	四、干燥器出口空气状态的确定	256
二、换热器	200	第五节 干燥过程的分析与计算	257
思考题	208	一、物料中水分的性质	257
习题	209	二、干燥曲线和干燥速率曲线	258
参考文献	212	三、干燥速率与干燥时间的计算	261
第四章 质量传递原理	213	第六节 干燥技术与设备	263
引言	213	一、干燥器的基本要求	263
第一节 传质基本概念	213	二、常见的干燥设备	264
第二节 分子扩散传质	216	思考题	268
一、斐克定律	216	习题	268
二、扩散系数	216	参考文献	269
三、伴随主体运动的分子扩散方程	219	第六章 燃烧原理与技术	270
四、传质体系中连续性方程	220	引言	270
五、稳态扩散传质	222	第一节 燃料的种类、组成及其使用性能	270
六、非稳态扩散传质	226	一、固体燃料——煤	270
第三节 对流传质	227	二、液体燃料	279
一、浓度边界层与对流传质系数	227	三、气体燃料	281
二、对流传质特征数方程	228	四、燃料的选用原则	284
第四节 相际传质	229	第二节 燃烧计算	285
一、相际平衡	230	一、分析计算	285
二、相律	231	二、检测计算	295
三、亨利定律和拉乌尔定律	231	第三节 燃料燃烧技术与设备	300
四、相际传质的双膜阻理论	232	一、气体燃料的燃烧技术与设备	300
五、相界面成分和薄膜传质系数	232	二、液体燃料的燃烧技术与设备	306
六、总传质系数	233	三、固体燃料的燃烧技术与设备	312
第五节 传质与化学反应	235	思考题	320
一、非均匀化学反应与扩散传质	235	习题	320
二、均匀化学反应与扩散传质	236	参考文献	321
三、球形颗粒的缩核反应与传质	236	附录	322

第一章 流体力学基础

引言

在大自然中，常见的物质以固态、液态和气态形式存在，其对应的物质分别称为固体、液体和气体。由于液体和气体具有通常所说的流动性，因此把液体和气体统称为流体。同时，与固体相比，流体不具有固定的形状，在外力的作用下能够连续变形；静止状态下的流体既不能承受特性拉力也不能承受剪切力。依据流体的上述特性，也可以把流体定义为自身不具有固定形状（形状由容器而定）、在微弱剪切力作用下能够连续变形的物质。

流体力学是力学的一个重要分支。与固体力学相似，流体力学是研究流体在静止和运动状态下的力学行为规律及其在工程实践中应用的一门学科。

随着科学技术和生产实践的不断发展，流体力学在各行各业乃至日常生活的方方面面都有着十分广泛的应用。自然界中空气不同形式的流动形成普通的风、台风、飓风和龙卷风是流体力学研究的范畴；河流中水的流动也属于流体力学的范畴。在诸多以水等液体或气体作为介质的行业，如发电行业、化工行业、材料行业、土木建筑等行业，凡是有流体参与的设备 and 设施，其中流体的行为必然受到流体力学相关规律的支配。可以说，由于流体无处不在，因此流体力学的规律也随处时时刻刻地影响着人们的生活和生产。了解和掌握流体力学的相关知识，对于了解、掌握、解释乃至控制自然规律起着十分重要的作用。随着工业化的不断发展，流体力学也已经在各个行业起到了不可或缺的作用。

材料行业是国民经济的支柱产业。材料运输、使用尤其是生产加工过程中都会有流体的参与。掌握流体的性质及流体力学的相关规律，才能正确有效地解决材料生产加工等各个环节所遇到的相应问题，为节约能耗、控制生产过程和优化生产工艺提供依据。

一、流体的主要物理性质

流体的运动状态不仅与外部条件（受力状态、边界条件）有关，还与其自身的物理性质有着密切的关系。

1. 密度

流体的密度是流体的最基本的物理性质之一。单位体积内流体的质量称为流体的密度，通常用符号 ρ 表示。其定义如式(1-1)所示：

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

式中 ρ ——流体的密度， kg/m^3 ；

m ——流体的质量， kg ；

V ——质量为 m 的流体相应的体积， m^3 。

如果流体是均质的，则流体的密度可以表示为：

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

流体的密度单位除了上述国际单位 (kg/m^3) 以外，常用的还有 g/cm^3 。

2. 比容

流体的比容定义为单位质量的流体所占的体积，用符号 ν 表示。

$$\nu = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta m} = \frac{dV}{dm} \quad (1-3)$$

由上述比容的定义式可知，比容是密度的倒数，即

$$\nu = \frac{1}{\rho} \quad (1-4)$$

比容的国际单位是 m^3/kg 。

3. 重度

流体的重度是指单位体积流体所受的重力的大小，用符号 γ 表示。

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} \quad (1-5)$$

式中 γ ——流体的重度， N/m^3 ；

G ——流体所受的重力， N 。

由于：

$$G = mg \quad (1-6)$$

式中 g ——重力加速度， m/s^2 。

因此重度和密度存在如下关系：

$$\gamma = \rho g \quad (1-7)$$

流体的密度、比容和重度均是温度和压力（压强）的函数，因此在给出流体的上述物理性质时，一定要说明其对应的温度与压力。

最常见的液体是水，其在标准大气压下不同温度时的密度、比容和重度见表 1-1。

表 1-1 标准大气压下不同温度时的密度、比容和重度

温度/ $^{\circ}\text{C}$	0	4	20	40	60	80	100
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	999.8	1000.0	998.2	992.2	983.2	971.8	958.4
重度 $\gamma/(\text{N}/\text{m}^3)$	9805.0	9807.0	9789.3	9730.5	9642.2	9530.4	9399.0
比容 $\nu \times 10^3/(\text{m}^3/\text{kg})$	1.0002	1.0000	1.0018	1.0079	1.0171	1.0290	1.0434

除了水以外，常见液体在标准大气压下的密度和重度见表 1-2。

表 1-2 标准大气压下常见液体的密度和重度

液体种类	乙醇(酒精)	苯	甘油	汞(水银)	液态氢	液态氧
温度/ $^{\circ}\text{C}$	20	20	20	0	-257	-195
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	789	895	1258	13600	72	1206
重度 $\gamma/(\text{N}/\text{m}^3)$	7738	8777	12337	133375	706	11827

从上述水的密度数据可以看出，水的密度随着温度的变化不是很大，同时，下面将要介绍的压缩性与膨胀性数据也表明，液体的密度随着压力的变化也不是很大。然而，对于气体而言，温度和压力对密度和重度的影响则非常明显。对于理想气体，其密度可以通过气体状态方程(1-8) 计算得到。

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-8)$$

式中 p ——气体压强， Pa ；

R ——气体常数, $R = \frac{R_m}{M}$, J/(kg · K);

R_m ——通用气体常数, $R_m = 8314 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$;

M ——气体的摩尔质量, kg/kmol;

T ——气体的热力学温度, K。

因此, 理想气体的密度为:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (1-9)$$

式(1-9)说明理想气体的密度与压强成正比, 与温度成反比。在压力不是很大、温度不是很低的情况下, 通常气体都可以看作理想气体, 在工程实际应用中, 其密度可以通过气体状态方程得到的密度公式(1-9)计算。

【例 1-1】 试分别计算空气、氧气和氮气在标准状态下的密度。

解: 标准状态下, 温度和压力分别为: $T_0 = 273.15 \text{ K}$, $p_0 = 101325 \text{ Pa}$ 。

空气、氧气和氮气的摩尔质量分别为:

$$M_a = 29, M_{O_2} = 32, M_{N_2} = 28$$

因此, 空气、氧气和氮气的气体常数分别为:

$$R_a = \frac{8314}{29} = 287 \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]}$$

$$R_{O_2} = \frac{8314}{32} = 260 \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]}$$

$$R_{N_2} = \frac{8314}{28} = 297 \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]}$$

根据式(1-9)可得:

$$\rho_a = \frac{p_0}{R_a T_0} = \frac{101325}{287 \times 273.15} = 1.293 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

同理: $\rho_{O_2} = 1.427 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ $\rho_{N_2} = 1.249 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

4. 黏性

尽管引言中讲到静止状态的流体不能够承受剪切力, 但是当流体处在运动状态时, 如果由于流体内部质点或者流层之间存在相对运动, 那么流体将产生与该运动相反方向的力以抵抗该相对运动。流体的这种抵抗流体质点(或流层)之间相对运动或者抵抗流体剪切变形的性质称为流体的黏性。

为了证明黏性的存在, 1687年著名科学家牛顿(Newton)通过研究两块平板间流体的层状运动进行了定量研究。实验装置如图1-1所示。两块平板之间的距离为 h , 面积为 A , 板之间充满流体。平板的面积足够大以致可以忽略平板的边缘效应。下面平板固定(速度为0), 上面平板以速度 U 沿着 x 方向向右作匀速直线运动。实验结果表明:

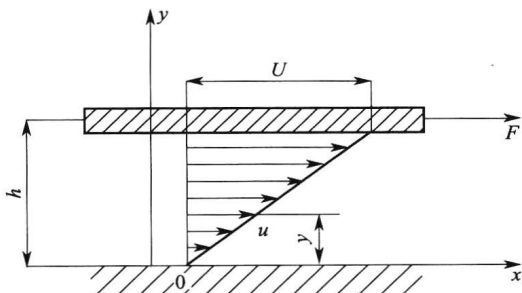


图 1-1 流体黏性实验装置

① 平板之间流体的速度沿着 y 方向呈直线分布, 即 $u = \frac{U}{h}y$ 。

② 维持平板向右作匀速直线运动的力 F 与平板的面积 A 的比值 $\frac{F}{A}$ 与 y 方向的速度变化率 $\frac{U}{h}$ 成正比, 即

$$\frac{F}{A} \propto \frac{U}{h} \quad (1-10)$$

由于上平板作匀速直线运动, 因此在 x 方向上除了受到力 F 以外, 必然还受到另外一个与之大小相等、方向相反的力 (设为 T) 的作用, 该力只可能由与上平板接触的流体给予, 该力就是流体由于流层之间的相互运动导致的黏性力。因此单位面积上黏性力 $\frac{T}{A}$ 的大小也与 $\frac{U}{h}$ 成正比。设比例系数为 μ , 则:

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{U}{h} \quad (1-11)$$

式中 τ ——单位面积的剪切力, 即切应力, Pa;

μ ——动力黏度系数, 简称黏度, Pa·s。

当速度分布非线性时, 可采用微分形式表示切应力:

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

这就是著名的牛顿内摩擦定律。

在对流体运动进行研究时, 除了动力黏度外, 还常用到运动黏度, 其定义为动力黏度与密度的比值, 即

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

式中 ν ——运动黏度, m^2/s 。

【例 1-2】 如图 1-2 所示, 有一轴承长 $L=0.5m$, 轴承的直径 $D=150mm$, 轴承与轴之间的间隙 $\delta=0.25mm$, 间隙内充满润滑油, 当轴以 $n=400r/min$ 的转速转动时, 测得转动所需的功率为 $N=456W$ 。求润滑油的黏度。

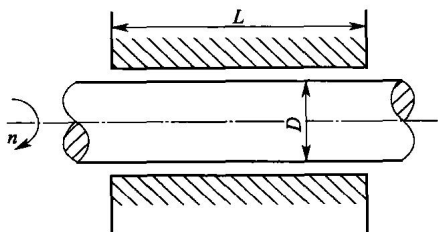


图 1-2 例 1-2 附图

$$\text{解: } N = T\nu = T r \omega = T \frac{\pi D n}{60}$$

$$T = \frac{60N}{\pi D n}$$

由于轴和轴承之间的间隙与轴直径相比很小, 间隙内润滑油的速度分布可以看作线性分布, 根据牛顿内摩擦定律:

$$T = \tau A = \mu \frac{du}{dy} A = \mu \frac{\pi D n}{60 \delta} \pi D L$$

因此:

$$\frac{60N}{\pi D n} = \mu \frac{\pi D n}{60 \delta} \pi D L$$

$$\mu = \frac{3600N\delta}{\pi^3 D^3 n^2 L} = \frac{3600 \times 456 \times 0.00025}{3.14^3 \times 0.15^3 \times 400^2 \times 0.5} = 0.049 \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$$

实验测量结果表明, 流体的动力黏度 μ 主要与温度有关, 而与压力关系不大。而运动黏度则随着温度和压力的变化而变化。表 1-3 和表 1-4 分别列出了不同温度下水及空气的运动黏度及动力黏度。

表 1-3 不同温度下水的黏度

温度 /°C	动力黏度 $\mu \times 10^3$ / (Pa·s)	运动黏度 $\nu \times 10^6$ / (m ² /s)	温度 /°C	动力黏度 $\mu \times 10^3$ / (Pa·s)	运动黏度 $\nu \times 10^6$ / (m ² /s)
0	1.792	1.792	50	0.549	0.556
5	1.519	1.519	60	0.469	0.477
10	1.308	1.308	70	0.406	0.415
20	1.005	1.007	80	0.357	0.367
30	0.801	0.804	90	0.317	0.328
40	0.656	0.661	100	0.284	0.296

表 1-4 不同温度下空气的黏度

温度 /°C	动力黏度 $\mu \times 10^5$ / (Pa·s)	运动黏度 $\nu \times 10^5$ / (m ² /s)	温度 /°C	动力黏度 $\mu \times 10^5$ / (Pa·s)	运动黏度 $\nu \times 10^5$ / (m ² /s)
-20	1.61	1.15	40	1.90	1.68
0	1.71	1.32	60	2.00	1.87
10	1.76	1.41	80	2.09	2.09
20	1.81	1.50	100	2.18	2.31
30	1.86	1.60	200	2.58	3.45

由表 1-3 和表 1-4 可以发现, 空气的动力黏度比水的动力黏度要小两个数量级, 同时水的黏度随着温度的升高而减小, 而空气的黏度则随着温度的升高而增大。其余的液体和气体的黏度随温度变化的规律也有所不同。液体的黏度随着温度的升高而减小; 而气体的黏度则随着温度的升高而增大。液体的黏度主要是由分子间吸引力引起的, 因此随着温度的升高, 分子键距离增大, 分子键作用力减小, 导致液体的黏度随着温度的升高而减小; 气体的黏度则主要由分子间热运动导致的分子间的相互碰撞引起, 因此随着温度的升高, 气体分子热运动显著加剧, 分子间碰撞概率增加, 导致气体黏度增大。

需要指出的是, 气体和绝大多数的纯净液体, 如水、乙醇和汽油等都遵循牛顿内摩擦定律, 因此把这类流体称之为牛顿流体。但是, 也有诸如泥浆、有机胶体和油漆等液体是不遵循牛顿内摩擦定律的, 通常把这类流体成为非牛顿流体。本书中主要介绍牛顿流体及其相关的力学行为。

5. 压缩性和膨胀性

在温度保持恒定的情况下, 流体的体积随着压强的增加而减小的特性称为流体的压缩性, 通常用压缩性系数 β 表示流体压缩性的大小。

$$\beta = -\frac{\left(\frac{dV}{V}\right)}{dp} = -\frac{1}{V} \times \frac{dV}{dp} = \frac{1}{\rho} \times \frac{d\rho}{dp} \quad (1-14)$$

由上述定义式可以看出, 流体的压缩性系数是指增加单位压强引起的流体体积减小比率或者密度增加的比率。式中负号表示压强的变化趋势与流体体积变化的趋势相反 (压强增大时流体体积减小, 反之亦然)。

压缩性系数 β 的倒数称为流体的弹性模量, 用符号 E 表示。

$$E = \frac{1}{\beta} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1-15)$$

压缩性系数 β 和弹性模量的单位分别为 m²/N 和 N/m²。

表 1-5 不同温度压强下水的压缩性系数

 m^2/N

温度/ $^{\circ}\text{C}$	压强/ MPa				
	0.50	1.0	2.0	4.0	8.0
0	5.40×10^{-10}	5.37×10^{-10}	5.31×10^{-10}	5.23×10^{-10}	5.15×10^{-10}
5	5.29×10^{-10}	5.23×10^{-10}	5.18×10^{-10}	5.08×10^{-10}	4.93×10^{-10}
10	5.23×10^{-10}	5.18×10^{-10}	5.08×10^{-10}	4.98×10^{-10}	4.81×10^{-10}
15	5.18×10^{-10}	5.10×10^{-10}	5.04×10^{-10}	4.88×10^{-10}	4.70×10^{-10}
20	5.15×10^{-10}	5.05×10^{-10}	4.95×10^{-10}	4.81×10^{-10}	4.60×10^{-10}

表 1-5 为水在不同温度和压强下的压缩性系数。表中数据说明，水的压缩性系数很小，说明压强对水的体积改变很小。这也是通常将水等液体看作不可压缩流体的主要依据。如果流体是气体，则在压强不是过高（20MPa）时，其压缩性系数可由气体状态方程推导得到。在温度保持恒定时，由理想气体状态方程可得：

$$\frac{d\rho}{d\rho} = RT \quad (1-16)$$

则

$$\beta = \frac{1}{\rho} \times \frac{d\rho}{d\rho} = \frac{1}{\rho} \times \frac{1}{RT} = \frac{1}{p} \quad (1-17)$$

如气体在一个大气压时，其压缩性系数为 $9.87 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{N}$ ，其数值要比水的压缩性系数大 4 个数量级。

在压强保持恒定的情况下，流体的体积随温度升高而增加（体积膨胀）的特性称为流体的膨胀性。通常用流体的（热）膨胀系数 α 定量表征流体的膨胀性。

$$\alpha = \frac{\left(\frac{dV}{V}\right)}{dT} = \frac{1}{V} \times \frac{dV}{dT} = -\frac{1}{\rho} \times \frac{d\rho}{dT} \quad (1-18)$$

由此可以看出，流体的膨胀系数表示升高单位温度时流体的体积增加率或密度减小率。式中负号表示温度变化趋势与密度变化趋势相反（温度升高密度下降，反之亦然）。膨胀系数的单位为 K^{-1} （或 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ）。表 1-6 为水在不同温度和压强下的热膨胀系数。

表 1-6 不同温度压强下水的热膨胀系数

 K^{-1}

压强/ MPa	温度/ $^{\circ}\text{C}$				
	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
0.1	0.14×10^{-4}	1.50×10^{-4}	4.22×10^{-4}	5.56×10^{-4}	7.19×10^{-4}
10	0.43×10^{-4}	1.65×10^{-4}	4.22×10^{-4}	5.48×10^{-4}	7.04×10^{-4}
20	0.72×10^{-4}	1.83×10^{-4}	4.26×10^{-4}	5.39×10^{-4}	—
50	1.49×10^{-4}	2.36×10^{-4}	4.29×10^{-4}	5.23×10^{-4}	6.61×10^{-4}
90	2.29×10^{-4}	2.89×10^{-4}	4.37×10^{-4}	5.14×10^{-4}	6.21×10^{-4}

在压强不是很大、温度不是很低的情况下，通常气体可看作理想气体，则气体的热膨胀系数可通过气体状态方程推导得到。在压强恒定的情况下，由气体状态方程可得：

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \times \frac{d\rho}{dT} = \frac{1}{T} \quad (1-19)$$

由此可知，压强不是很高、温度为 0°C 时气体的热膨胀系数为 $3.66 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ 。气体的

热膨胀系数比液体也大一个数量级。

6. 表面张力特性

当液体与其他流体或固体接触，在液体的自由表面的分子受到液体内部分子的吸引力而使得液体表层收缩产生的力称为表面张力。表面张力的大小用表面张力系数 α 来表示，其意义是液体表面单位线段长度上受到的表面张力。常见液体的表面张力系数列于表 1-7。从表中数据可以看出，液体的表面张力系数很小，工程中通常情况下可以忽略不计。只有在特殊情况下必须考虑表面张力的影响。

气体由于气体分子的扩散作用导致没有自由表面，也就不存在表面张力。表面张力是液体的特有性质。

表 1-7 20℃ 时液体的表面张力系数

液体名称	表面张力系数/(N/m)	液体名称	表面张力系数/(N/m)
酒精	0.0223	原油	0.0233~0.0379
苯	0.0289	水	0.0731
四氯化碳	0.0267	水银(空气中)	0.5137
煤油	0.0233~0.0321	水银(水中)	0.926
润滑油	0.0350~0.0379	水银(真空中)	0.1857

当液体表面是平面时，液体的表面张力不产生附加的压力的作用，但是只要液体表面呈曲面形状就会产生附加的表面压力。

液体与固体表面接触时，由于液体与固体表面的接触角通常不是直角，因此就会导致液体表面呈曲面状态而产生表面张力。不同的液体及固体接触，由于接触角的不同导致表面张力的不同。当把两端开口的细玻璃管插入水或水银时产生的液面上升和下降就是不同表面张力作用的结果，这种现象称为毛细管现象（如图 1-3 所示）。

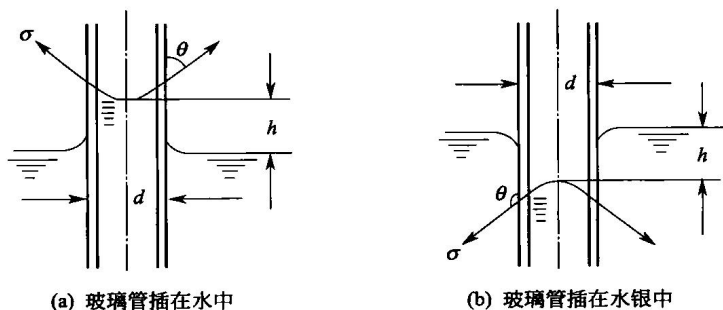


图 1-3 毛细管现象

由于液体的重力与其表面张力的垂直分力处于平衡状态，因此：

$$\frac{\pi}{4} d^2 \gamma h = \pi d \sigma \cos \theta \quad (1-20)$$

则玻璃管中液面上升或下降的高度为：

$$h = \frac{4\sigma}{d\gamma} \cos \theta \quad (1-21)$$

由此可知，管子直径越细时，毛细管现象的影响越大，例如利用玻璃管作为测压管时必须考虑该影响产生的误差。

二、作用在流体上的力

力是使物体运动状态发生改变的原因，因此研究流体处于平衡及运动状态下的规律必须对

流体所受的力进行分析。按照物理性质划分,作用在流体上的力包括惯性力、重力、压力、弹性力、黏性力及表面张力等。按照作用方式划分,流体所受到的力可以分成质量力和表面力。

1. 质量力

质量力是作用于每个流体质点或者微团上,并且与质量成正比的力。由于流体的质量与其体积密切相关,因此也将质量力称作体积力。在均质流体中,流体的质量与体积成正比,因此流体所受到的质量力也与体积成正比。

常见流体所受的质量力有惯性力和重力。惯性力是流体处于加速运动状态下由于惯性导致流体质点所受到的力。重力是地球对流体质点的万有引力。

作用在流体上的质量力通常用单位质量所受到的质量力(称为单位质量力)来表示。若流体质点或微团的质量为 m , 所受到相应的质量力为 F , 则单位质量力为:

$$f = \frac{F}{m} \quad (1-22)$$

式中 f ——流体受到的单位质量力, m/s^2 。

由于质量力是矢量,为运算方便,通常将流体受到的质量力 F 分解成空间坐标的分量。在直角坐标系中,质量力通常可以分解成 x 、 y 和 z 方向三个分量 F_x 、 F_y 和 F_z 。单位质量力 f 也可分解成 X 、 Y 和 Z 三个分量,则:

$$\begin{cases} X = \frac{F_x}{m} \\ Y = \frac{F_y}{m} \\ Z = \frac{F_z}{m} \end{cases} \quad (1-23)$$

对于流体所受到的最常见的质量力重力而言,通常流体仅仅受到 z 方向的重力,并且方向与 z 方向相反。因此有:

$$\begin{cases} X = \frac{G_x}{m} = 0 \\ Y = \frac{G_y}{m} = 0 \\ Z = \frac{G_z}{m} = -g \end{cases} \quad (1-24)$$

式中,负号表示重力的方向与通常设置的 z 轴方向相反。

2. 表面力

表面力是作用于流体表面上,并且与流体表面积成正比的力。此处所说的流体表面不仅包括流体的外表面,还包括流体内部的任意表面。由于表面力与面积密切相关(表面力均匀分布时与面积成正比),因此有时也将表面力称为面积力。

根据表面力与作用面的方向关系,又可将表面力分为法向力和切向力。法向力是指垂直作用于表面的表面力;而切向力是指平行作用于表面上的表面力。

与质量力的表示方法类似,通常用单位面积的表面力来表示表面力,通常称为应力。单位面积法向表面力和切向表面力分别称为法向应力和切向应力。对于流体而言,由于流体不能承受拉力,因此法向应力就是压强;而切向应力则主要是流体所受到的黏性力。

若流体某表面受到表面力的作用,则表面上各点的法向应力(压强)和切向应力可表示为:

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA} \quad (1-25)$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} = \frac{dT}{dA} \quad (1-26)$$

式中 p ——流体所受的压强, Pa;
 P ——流体所受的压力, N;
 A ——流体受力面面积, m^2 ;
 τ ——流体所受的剪切应力, Pa;
 T ——流体所受剪切力, N。

正如其他力学研究一样, 对流体进行正确的受力分析是研究流体力学的基础。

三、描述流体的力学模型

由于实际流体的结构及物理性质的复杂性, 在对流体进行研究时, 根据抓住主要矛盾的原则, 忽略某些对研究影响不大的因素, 简化流体的物质结构和物理性质, 对流体进行科学的抽象, 建立相应的物理模型和数学模型。

下面简要介绍流体力学中常用的力学模型。

1. 连续介质模型

实际流体是由大量的单个流体分子所组成的, 分子与分子之间彼此必然存在一定的间隙, 也就是说在分子尺度上对流体进行研究, 流体实际上是不连续的。但是流体力学中对流体流动规律的研究并非是单个分子的微观运动, 而是流体宏观的机械运动。所以在对流体进行力学研究时, 采用宏观尺寸非常小而微观尺寸足够大的流体质点为微元作为基本研究对象。流体质点或微元虽然尺寸足够小, 但依然包含足够的流体分子, 流体的物理性质及物理参数均取包含在流体质点或微元内的所有流体分子的平均值加以描述。

基于上述流体质点或微元的概念, 在研究流体的力学行为时, 可以把流体看做由无数个质点组成的均匀无间隙的连续体, 这就是连续介质模型。

连续介质模型可以使得在研究流体力学时不用考虑流体分子复杂的微观运动而仅仅考虑流体的宏观运动; 同时, 在描述流体的各种物理参数随空间变化时可以方便地利用数学中连续函数的概念, 为建立流体力学相关数学模型创造了十分有利的条件。

2. 理想流体模型

如前所述, 实际流体均具有黏性。流体的黏性产生的黏性力导致流体在运动时的受力分析和运动分析十分复杂。在某些情况下, 流体的黏性不起作用或者不起主要作用, 因此可以忽略流体的黏性, 这种忽略流体黏性的流体就称作为无黏性流体, 也称为理想流体。把流体作为理想流体进行流体力学相关研究的模型称为理想流体模型。在理想流体模型下对流体进行研究虽然多多少少与实际流体存在一定的差异, 但是可以为实际的黏性流体的研究提供必要的理论基础。

3. 不可压缩流体模型

理论上讲, 流体均具有压缩性和膨胀性。当流体在一定的条件下 (如温度和压力变化不大的情况下), 流体的压缩性和膨胀性导致的流体密度的变化对该种情况下流体的力学行为及运动状态影响很小时, 流体的密度变化就可以忽略。基于上述假设所建立的模型称为不可压缩流体模型。简单地说, 不可压缩流体模型就是假设流体密度可视为常数。在该模型前提下对流体进行研究可以大大简化数学模型, 方便数学处理。

第一节 流体静力学

流体静力学是研究流体处于静止或相对静止状态下的力学规律及其在工程技术上的应用。由于流体处于静止或相对静止状态, 因此流体内部不存在速度, 流体的黏性起作用。研

究流体静力学可以采用理想流体模型。

一、流体静压强及其特征

1. 流体静压强的定义

流体静止或相对静止状态下，单位流体面积所受到的静压力称为流体所受到的压强（在工程上有时将单位面积上的压力即压强简称为压力）。如静止流体中分离体（图 1-4）的一个面上有面积为 ΔA 的微元面积，其上受到的压力为 ΔP ，则压强为：

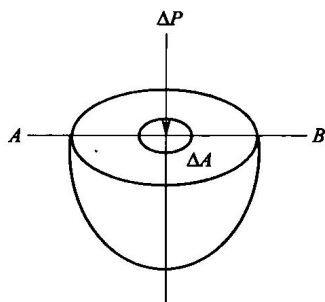


图 1-4 静止流体中的分离体

因此在流体静止或相对静止时，流体所受到的静压强必然与作用面垂直。同时，若流体的静压强是作用面的外法线方向，则流体就必然受到拉力，而流体是不能承受拉力的。综上所述，静止流体所受的静压强的方向一定是作用面的内法线方向。

(2) 静压强的大小与方向无关或者说流体中某点的静压强在各个方向上是相等的 如图 1-5 所示，取流体中任意一点 A 点，并建立如图所示的直角坐标系。

取微元四面体 ABCD。其中 A 点在坐标原点，B、C 和 D 点分别在 x、y 和 z 轴上。设该微元四面体的三个正交的边长分别为 dx、dy 和 dz，垂直于 x、y 和 z 轴的三个面上的压强分别为 p_x 、 p_y 和 p_z ，倾斜面 BCD 上的压强为 p_n 。 p_n 与 x、y 和 z 轴的夹角分别为 α 、 β 和 γ 。

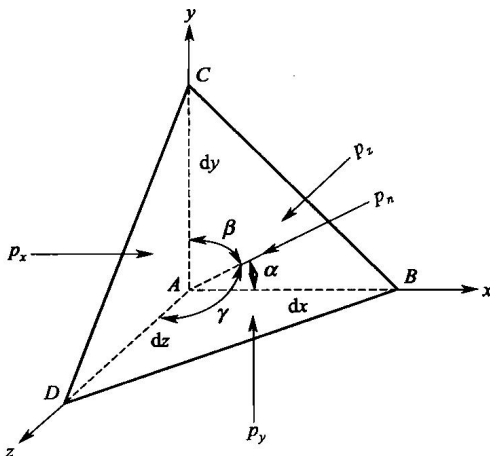


图 1-5 静止流体中的微元四面体

由于流体处于静止状态，受到的表面力只有压力，其大小即是各个面上的压强与面积的乘积，即

$$P_x = p_x \times \frac{1}{2} dydz$$

$$P_y = p_y \times \frac{1}{2} dzdx$$

$$P_z = p_z \times \frac{1}{2} dxdy$$

$$P_n = p_n dA \quad (dA \text{ 为倾斜面 } \triangle BCD \text{ 的面积})$$

假设流体的密度为 ρ ，流体所受到的单位质量力 f 在 x、y 和 z 方向上的分量分别为 X、Y 和 Z，则该微元四面体受到的总的质量力在 x、y 和 z 方向上的分量分别为：

$$F_x = \frac{1}{6} \rho X dxdydz$$

$$F_y = \frac{1}{6} \rho Y dxdydz$$

$$F_z = \frac{1}{6} \rho Z dx dy dz$$

微元四面体在上述外力作用下处于静止状态, 因此在 x 、 y 和 z 方向上的合外力为 0。以 x 方向为例, 根据 x 方向合外力为 0 可以得到:

$$P_x - P_n \cos \alpha + F_x = 0$$

即

$$\frac{1}{2} p_x dy dz - p_n dA \cos \alpha + \frac{1}{6} \rho X dx dy dz = 0$$

而

$$dA \cos \alpha = \frac{1}{2} dy dz$$

因此代入简化可得:

$$p_x - p_n + \frac{1}{3} \rho X dx = 0$$

忽略无穷小量 $\frac{1}{3} \rho X dx$, 则可得到:

$$p_x = p_n$$

同理可得:

$$p_y = p_n$$

$$p_z = p_n$$

因此

$$p_x = p_y = p_z = p_n \quad (1-28)$$

由于微元体斜面方向的任意性, 可以得到任意点 A 处的压强大小与方向无关, 或者各个方向的压强是相等的, 压强的大小只与位置有关, 因此研究流体所受的压强就只需研究流体静压强随空间位置变化的规律即可。流体静压强分布规律可以简单地表示成空间位置的函数。

$$p = f(x, y, z) \quad (1-29)$$

二、流体压强的表示方法与度量单位

1. 绝对压强与相对压强

绝对压强是指以绝对真空为零压强基准的压强, 通常用符号 p' 表示; 而相对压强则以当地同高程的大气压强为零压强基准的压强, 通常用符号 p 表示。

根据上述定义, 绝对压强与相对压强的关系可表示为:

$$p = p' - p_a \quad (1-30)$$

绝对压强只能是正值, 不可能出现负值, 而相对压强可正可负。

2. 表压与真空度

当相对压强为正, 即流体的绝对压强大于当地大气压时, 把这时的相对压强称为正压, 由于通常正压采用压力表测定, 故也称为表压; 当相对压强为负, 即流体的绝对压强小于当地大气压强时, 这时的相对压强称为负压。同时, 把负压的绝对值称为真空度 (即真空表读数), 用符号 p_v 表示。

因此表压和真空度可表示为:

$$\text{表压} \quad p = p' - p_a, \text{ 其中 } p' > p_a \quad (1-31)$$

$$\text{真空度} \quad p_v = |p' - p_a| = p_a - p', \text{ 其中 } p' < p_a \quad (1-32)$$

正压和负压情况下, 绝对压强、相对压强、表压和真空度的关系可以通过图 1-6 直观地