



教育部高职高专规划教材

流体流动与传热

王纬武 编

51.2-43

7

化学工业出版社
教材出版中心

21

教育部高职高专规划教材

流体流动与传热

王伟武 编

化学工业出版社
教材出版中心
·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

流体流动与传热/王伟武编. —北京: 化学工业出版社, 2001.10
教育部高职高专规划教材
ISBN 7-5025-3454-7

I. 流… II. 王… III. ①流体流动-高等学校: 技术学校-教材②传热学-高等学校: 技术学校-教材
IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 077075 号

教育部高职高专规划教材

流体流动与传热

王伟武 编

责任编辑: 高 钰

责任校对: 凌亚男

封面设计: 郑小红

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64918013

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市云浩印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 11¼ 字数 275 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3454-7/G·925

定 价: 19.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

随着我国科教兴国战略的实施, 职业技术教育的蓬勃发展, 加强相应的教材建设是当前刻不容缓的任务。流体流动与传热是制冷与空调、机械、工业自动化仪表、能源、化工、轻工等专业常见的工程技术问题, 《流体流动与传热》是按职业教育特点和要求, 为制冷与空调专业编写的技术基础课教材, 它也可作为机械、工业自动化仪表、能源、化工、轻工及其相近专业相应课程的教学参考书。

为适应职业技术教育应用性、针对性、岗位性以及专业性的特点, 本书在编写过程中, 内容以必需、够用为度, 举例尽量与工程实际相结合, 文字表达上力求简单易懂, 概念准确。教材中避开了一些数学要求高的公式推导过程, 侧重于基础知识、基本理论在实际应用中分析讨论, 注意培养和启发学生解决问题的思路、方法及能力。

本书共分两篇。第一篇为流体流动, 第二篇为工程传热学。全部内容讲课时数约为 70 学时, 其中加 * 号的内容可作为选讲内容。

本书由王伟武编写, 周立雪主审。参加审稿的还有叶萍, 刘弋潞, 周白皋, 蔡庄红, 林琪, 彭硕。本书在编写过程中, 得到了编者所在的南京化工职业技术学院相关教研室老师有力支持, 尤其是孙见君老师, 在教材内容与工程实际联系上提供了一些有益的建议, 在此一并表示衷心地感谢。

尽管在编写过程中得到了许多同志的支持和帮助, 但由于编者业务水平有限, 书中难免有欠妥和错误之处, 希望专家、读者予以批评指正, 以便再版时修正。

编 者

2001 年 8 月

目 录

绪 论	1
习 题	4

第一篇 流 体 流 动

第一章 概论	5
第一节 流体流动的研究对象	5
第二节 流体的基本性质	5
第三节 作用在流体上的力	9
习 题	12
第二章 流体静力学	13
第一节 压强的表示方法	13
第二节 流体静力学基本方程	14
第三节 静力学基本方程式的应用	16
* 第四节 作用在平面和曲面上的总压力	22
习 题	27
第三章 流体流动的基本概念和基本方程	30
第一节 流体流动的基本概念	30
第二节 定态流动的物料衡算——连续性方程	32
第三节 定态流动的能量衡算——柏努利方程式	34
* 第四节 定态流动的动量方程式	42
习 题	44
第四章 流体的流动阻力	46
第一节 流体的两种流动类型	46
第二节 圆形管内的速度分布与边界层概念	49
第三节 流体在管内流动阻力的计算	51
第四节 减小流动阻力的途径	63
习 题	64
第五章 流体流动计算的综合应用	66
第一节 管路计算	66
第二节 孔口和管嘴出流	75
第三节 流量的测量	77
习 题	80
第一篇 主要符号说明	82

第二篇 工程传热学

第一章 概论	83
第一节 传热学在工程上的应用	83
第二节 热量传递的基本方式	83
第三节 工业换热方式	84
第四节 定态传热和非定态传热	86
第五节 传热速率与热通量	86
第二章 热传导	87
第一节 傅里叶定律和热导率	87
第二节 平壁一维定态热传导	89
第三节 圆筒壁定态导热	94
第四节 肋片的定态导热	96
习 题	102
第三章 对流给热	103
第一节 过程分析与牛顿冷却定律	103
第二节 影响对流给热系数的主要因素	105
第三节 无相变时对流给热系数	106
第四节 流体有相变时对流给热	114
习 题	119
第四章 辐射传热	120
第一节 热辐射的基本概念和基本定律	120
第二节 固体壁面之间的辐射传热	123
第三节 对流和辐射的联合传热	125
习 题	126
第五章 传热计算	127
第一节 热负荷	127
第二节 传热基本方程式	129
第三节 传热系数	130
第四节 传热平均温度差	134
第五节 传热过程计算举例	139
习 题	143
第六章 换热器	145
第一节 间壁式换热器	145
第二节 工程上常用的加热剂和冷却剂	151
第三节 列管换热器设计与选型原则	152
第四节 传热过程的强化和削弱	157
习 题	160
第二篇 主要符号说明	161
附 录	162

一、单位换算表.....	162
二、水的物理性质.....	162
三、水在不同温度下的粘度.....	163
四、干空气的物理性质 ($p = 101.3\text{kPa}$)	163
五、饱和水与干饱和蒸气表 (按温度排列)	164
六、饱和水与干饱和蒸气表 (按压力排列)	166
七、常见固体的热导率.....	167
八、管子规格.....	168
九、列管式换热器标准系列 (摘录)	169
参考书目.....	171

绪 论

一、课程的性质及研究对象

《流体流动与传热》是制冷与空调专业开设的一门重要的技术基础课，它包括流体流动和工程传热学两部分。

流体流动是研究流体在平衡和运动时所遵守的规律及其在工程中的应用。制冷与空调工程中常涉及到管路布置和计算、输送机械所需功率计算、流体测量及换热设备的强化等，因此流体流动是本课程的基础。

工程传热学是研究热量传递过程规律的一门科学。在工程上常遇见如何解决增强传热和削弱传热这两类实际问题，工程传热学将从热量传递的机理、方式、影响因素等方面去分析和解决上述的工程传热问题，并对换热设备的结构、原理以及设计计算进行较详细的介绍。

二、本课程与制冷空调专业的关系

本课程与制冷空调专业关系密切，可以从以下两个实例得到了了解。

1. 蒸气压缩制冷系统

如图 0-1 所示，制冷系统由压缩机 1、冷凝器 2、节流阀 3 和蒸发器 4 四个主要部分组成。在系统中注入制冷剂（氟里昂或氨等）。首先，压缩机从蒸发器吸入气氨或其他气态制冷剂，然后进行压缩，成为高温高压的过热蒸气进入冷凝器，在冷凝器内高压气态的制冷剂被水冷却、进而冷凝为液体状态，液态制冷剂再经节流阀降压降温后进入蒸发器，在蒸发器中低温液态制冷剂从被冷却物体中吸收大量的热量后气化，实现被冷却的物体温度降低。从蒸发器出来的气态制冷剂再进入压缩机，制冷剂在系统中不断循环。

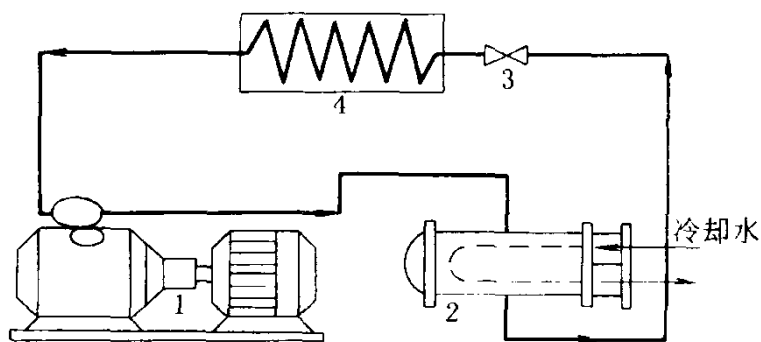


图 0-1 蒸气压缩制冷系统

冷凝器是制冷装置中向系统外输送热量的必需设备，其作用是将压缩机出口压出的制冷剂过热蒸气冷凝液化后送入贮液器以备制冷使用。

图 0-2 为制冷装置中常用的吹风蒸发式冷凝器原理示意图，来自压缩机的制冷剂蒸气从先进入进气集管 1，再分配到冷却管组 2 的每一根蛇形盘管内与管外的冷却水进行热量交换，被冷凝液化后经冷却管组下部出液集管 3 送入贮液器。冷却水由水泵 4 将水盘 5 中的水送到冷却管组上方的喷淋管 6 中，从喷嘴喷淋到每根盘管上，沿冷却管组外表面向下流动，有少部分水受热蒸发成水蒸气，没有被蒸发的水最后流落到水盘中，再由泵 4 抽走循环使用。通风机 7 可加速空

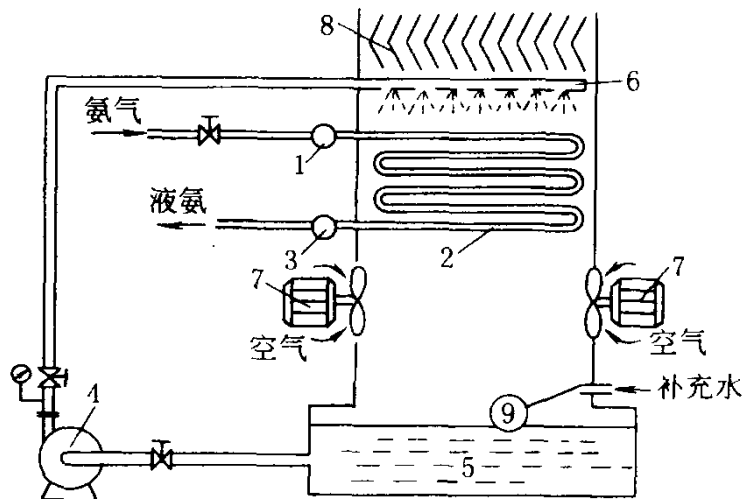


图 0-2 吹风蒸发式冷凝器示意图

气的流动，气流方向与水流方向相反，可及时地将冷却水蒸发的水蒸气带走，强化了管外表面的传热效果。为了减少混在水蒸气中的细小水滴被风吹走，在喷淋管的上方装有挡水板 8 将夹带的水滴分离下来。补充水是弥补传热过程中被蒸发的水量，需要补充的水量由浮球阀 9 控制。

2. 空气温度和湿度的调节

图 0-3 所示为一个二次回风空调系统。为了保证空调房间空气的温度和湿度，将新风（新鲜空气）送入空调系统，通过空气过滤器 1，再经过空气预热器 2，送入混合室 3 与空调房间的一次回风相混合后，进入淋水室 4 与喷淋水相接触以调节空气的温度和湿度，然后再经过挡水板 5 除去空气中夹带的水沫，送入加热器 6 将空气加热到所需的温度，进入混和室 7 与空调房间的二次回风混合，最后经风机 8 送入空调房间 9。空调系统中回风的主要目的是为了减少过程的热量或冷量，其中二次回风还可以用于减少空调房间的温度和湿度差。以降湿为主要目的的空调系统中，不需要预热器 2，所采用的淋水温度应低于空气的露点；以降温为主要目的的空调系统，不需要加热器 6。因此，空调系统的操作应根据实际需要加以调节。

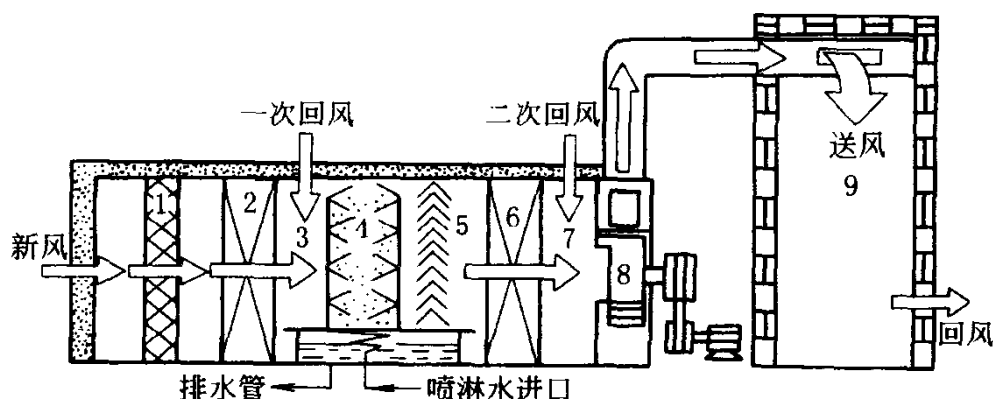


图 0-3 二次回风空调系统

以上两例是制冷与空调专业有关的典型设备系统。可以发现制冷与空调系统中制冷剂、冷却水、空气的流动，都必须确定其流动阻力的大小，能量消耗的多少，所需输送机械的类型、型号以及管径的选择和管路的安装，这些属于流体流动研究的范围。制冷剂的蒸发和冷凝以及空气调节系统中空气的加热和冷却等均属于传热过程。其过程中所需的换热设备类型、传热面积的大小、换热器的选用以及设备和管道的保温等都需要工程传热学方面的相关知识。因此，学好本课程将会为今后学习专业课程奠定一个良好基础。

三、学习本课程的几点要求

由于流体流动和传热过程的复杂性，其影响因素很多，本课程将涉及到的某些理论和某些计算公式，并不完全是通过数学推理出来的，而是通过数学推理与实验相结合的方法，或者是通过大量实验而总结出来的，这是本课程的重要特点之一。为了能学好本课程，各章节都安排了许多甚至是很复杂的计算习题。计算过程中所需的某些计算公式、流体的物理性质及其单位的确定，都是学习本课程时要注意的问题，这也是今后在实际工程计算中必须注意的问题。为此，提出以下几点要求。

1. 要学会查阅工程手册

由于研究人员对某一具体问题的研究方法或实验条件等不尽一致，因此，对某些过程规律的描述有不同的计算公式。另外，还有许多通过实验总结出来的图、表、以及大量的经验

数据等，这些都是将要进行有关计算所需要的，作为一名未来的工程技术人员，必须具备迅速而准确地查阅工程手册，以便从中找到有关资料或数据的能力。

为了使读者能初步掌握查阅工程手册的能力，本书附录中选录了一部分有关的资料，希望读者认真学会查阅的方法。

2. 掌握不同单位制之间的换算

长期以来，工程计算中存在着多种单位制共存的局面，致使计算和技术交流极不方便。1960年10月第十一届国际计量大会上正式通过一种优越性较大的单位制，称为国际单位制，代号为SI。中国国务院在1984年颁布命令，确定中国统一实行以国际单位制为法定单位，规定从1991年起，除个别领域外，不允许再使用非法定单位。

本书是采用了法定的SI制，但考虑目前存在的书籍和手册中还有的是采用非法定单位，所以在个别例题和习题有意识的编入一些非法定单位，以有助于训练同学掌握各种单位制之间的换算。

在进行物理量的单位换算时，物理量本身的量并没有改变，只是由于所采用的单位不同，所以在数字上要有所变化，因此单位换算时首先解决的是两单位间的换算因数问题。所谓换算因数，就是彼此相等而各有不同单位的两物理量的比值。如 $1\text{m}=100\text{cm}$ 中100为m和cm之间的换算因数。常见单位制中的各种单位之间换算因数见附录一。

另外在单位换算时，对单位的词头要有一个清楚的认识，SI单位制用于构成十进倍数和分数单位的词头列于表0-1中。

表 0-1 SI 单位制用于构成十进倍数和分数单位的词头

所表示的因数	词头名称	符 号	所表示的因数	词头名称	符 号
10^{18}	艾	E	10^{-1}	分	d
10^{15}	柏	P	10^{-2}	厘	c
10^{12}	太	T	10^{-3}	毫	m
10^9	吉	G	10^{-6}	微	μ
10^6	兆	M	10^{-9}	纳	n
10^3	千	k	10^{-12}	皮	p
10^2	百	h	10^{-15}	飞	f
10^1	十	da	10^{-18}	阿	a

【例 0-1】 计算将 $1\text{kgf}/\text{cm}^2$ 换算为以Pa为单位的换算因数以及将 $1\text{kcal}/(\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 换算为 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 为单位的换算因数。

解：(1) $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$ $1\text{kgf}=9.81\text{N}$ $1\text{cm}=1/100\text{m}$

$$1\text{kgf}/\text{cm}^2 = \frac{9.81}{\left(\frac{1}{100}\right)^2} \text{N}/\text{m}^2 = 9.81 \times 10^4 (\text{Pa})$$

(2) $1\text{cal}=4.187\text{J}$ $1\text{W}=1\text{J}/\text{s}$ $1\text{h}=3600\text{s}$

单位中的 $^\circ\text{C}$ 指的是温度变化 1°C ，也就是改变了 1K 。

$$1\text{kcal}/(\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}) = \frac{4.187 \times 10^3}{3600} \text{J}/(\text{s}\cdot\text{K}\cdot\text{m}^2) = 1.163 [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$$

3. 控制合理的误差率

由于对同一个问题的计算可以采用不同的方法或不同的计算公式进行计算，其结果可能

不完全相同；在计算过程中用某些图表查取所需要的数据时，也会出现不可避免的误差，所有这些都是在工程计算中的正常现象。另外，本课程中有许多半经验半理论公式，尽管经过实践证明这些公式能够解决工程中一些实际问题，但与生产实际情况仍有一定的差异。因此，要在工程计算中引进误差率的概念。

$$\text{误差率} = \frac{\text{两种方法计算结果的差值}}{\text{任一种方法的计算值（一般取其中较大值）}} \times 100\%$$

一般来讲，工程允许的误差率应控制在 5%（少数可控制在 10%）以内。也就是说，工程计算中只要其结果误差率在允许的范围之内，都可认为是有效的或可行的。

习 题

- 0-1 4L/s 等于多少 L/min? 4L/s 等于多少 m³/h?
- 0-2 5kgf·m/s 等于多少 J/s? 5kgf·m/s 等于多少 kW?
- 0-3 确定单位 kcal/h 与功率 W 之间的换算因数。
- 0-4 3kgf/m² 等于多少 Pa?

第一篇 流体流动

第一章 概 论

第一节 流体流动的研究对象

流体流动是研究流体的机械运动规律以及运用这些规律去解决实际工程问题的一门学科。

流体流动的研究对象是流体。流体是液体和气体的总称，其基本特性是它具有流动性。所谓流动性就是在静止时不能承受剪切力的性质，当有剪切力作用于流体时，流体就会产生连续的变形，也就是说流体质点之间就会产生相对运动。气体和液体同属流体，他们有共性，也有各自的特性：如液体很不容易被压缩，在容器中能够形成一定的自由表面；而气体则很容易被压缩，它总是充满容纳它的整个容器，没有自由表面。所以在讨论它们共性的同时，也要讨论它们各自的特性和处理方法。

流体连续性假定：从物理学中知道，流体是由大量的流体分子组成，分子之间有间隙，所以从微观上看，流体分子不是一种连续分布的物质。这些流体分子处于杂乱的热运动状态中，要想跟踪每一个分子，详细地去研究分子的运动规律是没有工程价值的，工程上只需要研究流体宏观表现出来的性质就够了。因此，流体流动引入了流体具有连续性的假定：认为流体是由彼此之间没有间隙的无数流体微团（又称为流体质点）所组成，是一个内部没有间隙的连续体。事实说明，引入这样一个假定是合理的，这是因为在工程实际中，所要解决的流体流动问题都有较大的特征尺寸，其最小尺寸也是远大于分子之间距离，分子之间距离比起工程尺寸极其微小，完全可以忽略，可以将流体看为无间隙的连续体。这样流体流动所研究的流体就是一种连续介质，它使得流体一切的力学性质都可以被看为变量的连续函数，因而在解决流体流动实际问题时，就能用连续函数这一有力的数学工具去分析和研究。

这里必须指出：并不是在任何情况下都可以将流体视为连续介质，如高度真空下的气体，连续性假定就不再适用。

第二节 流体的基本性质

在研究流体平衡和运动规律之前，必须要熟悉流体的一些基本性质。它们是流体的密度、表面张力等。

一、流体的密度、比容、相对密度

（一）密度

流体和其他物体一样具有质量。单位体积流体所具有的质量称为密度，通常用 ρ 表示。如均质流体的体积为 V ，质量为 m ，则密度 ρ 为

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

在 SI 制中质量单位用 kg，体积单位用 m^3 ，所以密度的单位为 kg/m^3 。

1. 液体的密度

一定的流体，其密度是压力和温度的函数。液体可视为不可压缩流体，密度随压力变化很小（极高压力下除外），可忽略其影响。温度对液体的密度有一定的影响，在查取液体密度时，要注意注明其温度条件。但在温度变化不大的情况下，也可忽略温度的影响。如水在常温下的密度都可按 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 计。

2. 气体的密度

气体的压缩性和膨胀性要比液体大的多，无论是压强还是温度，对气体密度的影响都不能忽略，所以气体为可压缩流体，气体的密度是温度和压强的函数。在压强不太高、温度不太低的情况下，对空气和一些不易液化的气体，可以用下式表达气体密度与其压强和温度之间的关系

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-1-2)$$

式中 ρ ——气体的密度， kg/m^3 ；

p ——气体的绝对压强，kPa；

M ——气体的摩尔质量， kg/kmol ；

T ——气体的绝对温度，K；

R ——气体常数，数值为 $8.314\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ 。

气体的密度也可按下式进行计算

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0} \quad (1-1-3)$$

式中 ρ_0 ——标准状况下气体的密度， kg/m^3 ；

$$\rho_0 = \frac{M}{22.4}$$

T_0 ——标准状况温度，K， $T_0 = 273\text{K}$ ；

p_0 ——标准状况压强，kPa， $p_0 = 101.33\text{ kPa}$ 。

尽管气体具有较大的压缩性和膨胀性，但是在许多实际问题中，只要气体速度远小于音速，密度变化不大，即 $\left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \times 100\%\right) \leq 20\%$ 时，也可将气体作为不可压缩流体处理。本篇主要讨论的是不可压缩流体的运动规律，对可压缩流体讨论时，将特别指出。

3. 混合物密度的确定

工程中常见的流体为混合物，以下介绍液体混合物和气体混合物平均密度的计算方法。

若几种纯液体混合前的分体积之和等于混合后的总体积，则混合液体的平均密度可按下式计算

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} + \dots + \frac{a_n}{\rho_n} \quad (1-1-4)$$

式中 ρ_m ——液体混合物的平均密度， kg/m^3 ；

$a_1、a_2 \cdots a_n$ ——液体混合物中各组分的质量分数， $a_1 + a_2 + \dots + a_n = 1$ ；

$\rho_1、\rho_2 \cdots \rho_n$ ——液体混合物中各组分的密度， kg/m^3 。

气体混合物的平均密度仍可用式 (1-1-2) 计算，即

$$\rho_m = \frac{pM_m}{RT} \quad (1-1-5)$$

应注意：式中的 p 为混合气体的总压， M_m 为混合气体的平均摩尔质量，即

$$M_m = M_1y_1 + M_2y_2 + \cdots + M_ny_n \quad (1-1-6)$$

式中 $M_1, M_2, \cdots, M_n$ ——气体混合物中各组分的摩尔质量，kg/kmol；

$y_1, y_2, \cdots, y_n$ ——气体混合物中各组分的摩尔分数或体积分数， $y_1 + y_2 + \cdots + y_n = 1$ 。

常见液体和气体的密度可由有关书刊或手册中查取。本书附录中选录有部分气体和液体的密度，可在计算时选用。

【例 1-1-1】 由 A 和 B 组成的混合液，其中 A 的质量分数为 0.4。已知常压、20℃ 下 A 和 B 的密度分别为 879kg/m³ 和 1106kg/m³。试求该条件下混合液的密度。

解：由式 (1-1-4) 可得

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} = \frac{0.4}{879} + \frac{(1-0.4)}{1106} = 9.98 \times 10^{-4}$$

所以

$$\rho_m = 1002 \text{ kg/m}^3$$

【例 1-1-2】 干空气的组成近似为 21% 的氧气，79% 的氮气（均为体积分数）。试求压强为 294kPa、温度为 80℃ 时空气的密度。

解：氧气的摩尔质量为 32 kg / kmol，氮气的摩尔质量为 28 kg / kmol，干空气的平均摩尔质量为

$$M_m = 32 \times 0.21 + 28 \times 0.79 = 28.84 \text{ (kg/kmol)}$$

$$\rho_m = \frac{pM_m}{RT} = \frac{294 \times 28.84}{8.314 \times (273 + 80)} = 2.89 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

(二) 比容

单位质量流体所具有的体积称为流体的比容，用符号 v 表示。其表达式如下

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-1-7)$$

由式可见，流体的比容是密度的倒数，单位为 m³/kg。

(三) 相对密度

流体的密度 ρ 与 4℃ 时蒸馏水的密度 ρ_w 之比值称为相对密度，用 d 表示。

$$d = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (1-1-8)$$

相对密度是一个无量纲量，无单位，不要与密度相混淆。由于 4℃ 蒸馏水的密度 $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ ，所以流体密度与其相对密度之间的关系为：

$$\rho = 1000d \quad (1-1-9)$$

二、液体的表面张力和毛细管现象

(一) 表面张力

从物理学中得知，在物体的表面层中，每个分子都受到垂直于液面并指向液体内部的不平衡力。在这个力的作用下，液体表面层中的分子有尽量挤入液体内部的趋势，因而液体要尽可能的缩小它的表面积。在宏观上，液体表面就好像是拉紧的弹性膜，使液体表面有尽量收缩的趋势，这种收缩趋势的力称为表面张力。

表面张力的大小以作用在单位长度上的力来表示，即表面张力系数 σ 。在 SI 单位制中，表面张力系数的单位为 N/m。

表 1-1-1 和表 1-1-2 中分别给出了水和几种常见的液体在空气中的表面张力系数。

表 1-1-1 水的表面张力系数

温度/℃	0	10	20	30	40	60	80	100
$\sigma \times 10^3 / (\text{N/m})$	75.6	74.2	72.8	71.2	69.2	66.2	62.6	58.9

表 1-1-2 几种常见液体表面张力系数 (20℃)

液体名称	水	水银	四氯化碳	酒精	甘油	煤油	苯	润滑油
$\sigma \times 10^3 / (\text{N/m})$	72.8	465	25.7	22.3	65	27	28.9	36

(二) 润湿现象

液体与固体相接触时, 如果液体分子和固体分子之间的相互吸引力 (附着力) 大于液体分子之间吸引力 (内聚力) 时, 就产生液体能润湿固体的现象, 如图 1-1-1 (a) 所示; 如附着力小于内聚力时, 就产生液体不能润湿固体的现象, 如图 1-1-1 (b) 所示。

由图 1-1-1 (a) 和 (b) 可知, 对于能润湿固体的液体, 接触角 θ 是锐角 ($\theta < \frac{\pi}{2}$), 对于不能润湿固体的液体, 接触角为钝角 ($\theta > \frac{\pi}{2}$)。实验表明, 20℃ 水与玻璃的接触角为 8.5° , 水银与玻璃的接触角为 140° 。

在圆柱形的管子里, 能润湿固体的液体表面呈凹形, 见图 1-1-2 (a); 不能润湿固体的液体表面呈凸形, 见图 1-1-2 (b)。

(三) 毛细现象

当表面张力的数值较小时, 工程上常忽略表面张力的影响, 但是当内径较小的管子插入液体时, 管内外液面会产生高度差, 如图 1-1-2 所示。如果液体能润湿管壁, 则使得液体表面增大, 而表面张力作用是使液体表面积尽可能的缩小, 结果是管内液体升高, 见图 1-1-2 (a); 同理如液体不能润湿管壁, 管内液面下降, 如图 1-1-2 (b)。这种液体在细管内上升或下降的现象称为毛细现象。

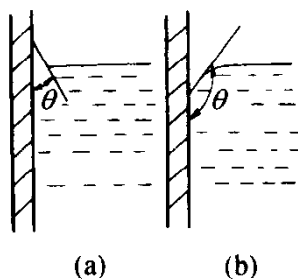


图 1-1-1 液体的润湿现象图

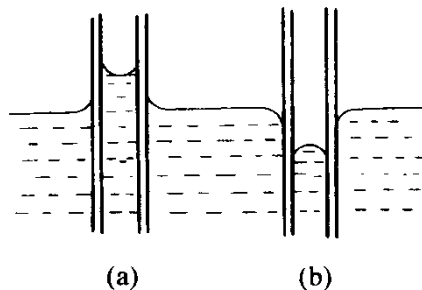


图 1-1-2 毛细现象图

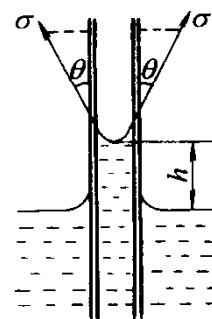


图 1-1-3 毛细管内液体上升的高度

为了研究毛细管内液面上升或下降的规律, 现以图 1-1-3 所示液体能润湿管壁的情况为例。当表面张力与上升液柱重力相等时, 液柱自然平衡, 此时有如下关系

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

$$h = \frac{4 \sigma \cos \theta}{\rho g d} \quad (1-1-10)$$

式中 σ ——液体的表面张力, N/m;

θ ——接触角, $^\circ$;

ρ ——液体密度, kg/m^3 ;
 h ——液体在管中上升高度, m ;
 g ——重力加速度, $9.81\text{m}/\text{s}^2$;
 d ——毛细管的内径, m 。

由式 1-1-10 可看出, 对不能润湿固体壁面液体, $\theta > \frac{\pi}{2}$, h 值为负值, 表示管内液面下降, 水银在玻璃管内就是属于这种情况。

【例 1-1-3】 在 293K 水中同时插入两根内径分别为 10mm 和 30mm 的玻璃管, 求水在管中的上升高度。

解: 由前述内容已知 293K 水与玻璃的接触角为 8.5° , 查表 1-1-2, 其表面张力系数 $\sigma = 0.0728\text{N}/\text{m}$, 由附录查得水的密度为 $998.2\text{kg}/\text{m}^3$ 。

内径为 10mm 的玻璃管中水上升高度为

$$h = \frac{4\sigma \cos \theta}{\rho g d} = \frac{4 \times 0.0728 \times \cos (8.5)}{998.2 \times 9.81 \times 0.01} = 0.00294 (\text{m}) = 2.94 (\text{mm})$$

内径为 30mm 的玻璃管中水上升高度为

$$h = \frac{4 \times 0.0728 \times \cos (8.5)}{998.2 \times 9.81 \times 0.03} = 0.00098 (\text{m}) = 0.98 (\text{mm})$$

由上例可知管内径越小, h 值越大。在实际应用中, 常用细玻璃管来测量流体压力和液位高度, 由于毛细现象, 将会产生一定误差, 因此对测管的管径有一定的要求。对单管压差计, 当作精密测量时, 如工质为水, 则管内径不得小于 15mm; 如果为水银, 则管内径不得小于 20mm。对一般 U 形管压差计, 由于受体积的限制, 管内径不宜做的太大, 通常约为 8mm。

第三节 作用在流体上的力

流体所受的力可以分为外力和内力两大类。流体内部分子之间的作用力称为内力, 它包括分子之间的引力、压力及内摩擦力, 它对流体的运动没有影响。外界作用于所研究的那块流体上的力称为外力, 它又分为表面力和质量力两种。流体运动的情况决定于外力, 它是研究的主要对象。

一、质量力

质量力是作用在所研究的流体各个质点上的一种力, 其值大小与流体质点的质量成正比。对均质流体, 这种力的大小与所研究的流体体积成正比, 所以又称为体积力。流体在重力场运动时所受到的重力, 在离心力场所受到的离心力都是典型的质量力。重力和离心力都是一种场力。质量力往往以单位质量流体来度量, 作用在单位质量流体上质量力称为单位质量力。

二、表面力

表面力作用在所研究的那块流体表面上, 其值大小与流体的表面积成正比。它又可分为垂直作用于流体表面的法向力和平行作用于流体表面的切向力。垂直作用于流体表面的力称为流体静压力, 单位流体面积上的流体静压力称为压强。平行作用于流体表面的力称为剪切力, 单位流体面积上的剪切力称为剪应力。

(一) 流体的静压力和静压强

流体静压力和流体静压强的区别在于: 流体静压力是作用在某一流体面积上的总压力,

压强则是作用在单位面积上的压力。工程上习惯将流体静压强称为压力，而将流体静压力称为总压力。若以 P 表示流体的总压力、 A 表示流体的作用面积，则流体的压强 p 为

$$p = \frac{P}{A} \quad (1-1-11)$$

总压力 P 的单位 N 、面积 A 的单位为 m^2 ，则压强 p 单位为 N/m^2 ，也称为帕斯卡 (Pa)，简称为帕。

流体压强具有以下两个重要特性。

① 流体静压强的方向总是与作用面相垂直，并指向作用面。

作用在流体表面上的力有法向力和切向力，对静止流体，流体各部分没有相对运动，切向力为零，所以作用在流体上的表面力只有法向力，静压强为单位面积上的法向力，所以静压强的方向与作用面相垂直，也必然指向其作用面。

② 静止流体中任意一点流体静压强的大小与其作用面的方向无关，即在同一点上各个方向的流体静压强相同。

(二) 流体的剪切力和粘度

1. 牛顿粘性定律

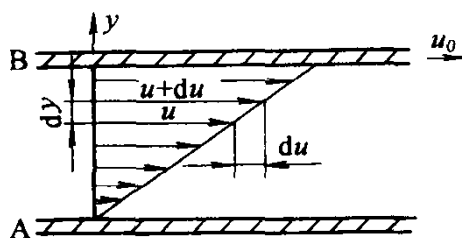


图 1-1-4 平板间流体速度变化图

静止流体不能承受任何切向力，当有切向力作用时，流体不再静止，将发生连续不断的变形，其内部质点间产生相对运动，同时各质点间产生剪切力以抵抗其相对运动，流体的这种性质称为粘性，所对应的剪切力称为粘滞力，也称为内摩擦力。

设有两块平行的平板，其间充满流体，如图 1-1-4 所示。假定 A 板固定，B 板以某一速度 u_0 向右移动。由于流体与板间的附着力，紧贴 B 板的流体层附着在板上，以速度 u_0 随 B 板向右运动，而紧贴 A 板的一层流体将如 A 板一样静止不动。介于两板之间的各层流体，自上而下以逐层递减的速度向右移动。流动较快的流体层带动流动较慢的流体层；反之流动较慢的流体层却又阻止流动较快的流体层向前运动，从而两层流体之间产生了内摩擦力。

内摩擦力如何确定？根据牛顿研究的结果，发现流体运动时所产生的内摩擦力与流体的物理性质有关，与流体层的接触面积和接触面法线方向的速度梯度成正比。其关系可用下式表示

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

式中 F ——流体层与流体层间的摩擦力， N ；

S ——流体层间的接触面积， m^2 ；

$\frac{du}{dy}$ ——速度梯度，即流体层速度在流动方向上的法向变化率， $1/s$ ；

μ ——表示流体物理性质的比例系数，称为动力粘度，简称粘度， $Pa \cdot s$ 。

单位面积上的内摩擦力（称为剪应力）可表示为：

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-1-13)$$

式 (1-1-12) 和式 (1-1-13) 两表达式称为牛顿粘性定律。流体静止时， $du/dy = 0$ ，所以不呈现内摩擦力。对运动的流体，凡遵循牛顿粘性定律流体的称为牛顿型流体，如空气和