

21 世纪高等院校教材

工程流体力学

归柯庭 汪军 王秋颖 编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是工科大学使用的流体力学教材.它力求反映“高等教育面向 21 世纪教学改革计划”的成果,与国际发展趋势一致,突出重点,强化基础,联系实际,学以致用.其主要内容有流体物理性质,流体静力学,流动特性,动力学分析基础,量纲分析与相似原理,不可压缩黏性流体的内部、外部流动、无黏流动,可压缩流体的流动,计算流体力学等.每章均附有习题,供读者练习.

本书可供大学工科土建、机械、环境、能源、动力等专业本科学生使用.

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学 归柯庭,汪军,王秋颖编. —北京:科学出版社,2003

(21 世纪高等院校教材)

ISBN 7-03-011308-X

. 工... . 归... 汪... 王... . 工程力学:流体力学 - 高等学校 - 教材 . TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 021352 号

责任编辑:林 鹏 杨 波 责任校对:宋玲玲

责任印制:张克忠 封面设计:黄华斌

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003 年 7 月第 一 版 开本:B5(720 × 1000)

2006 年 6 月第四次印刷 印张:22 1 4

印数:7 501—9 500 字数:423 000

定价:31.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换 新欣)

前 言

流体力学是人类在利用流体过程中逐步创建的一门学科,它的发展始终与人类的生产实践紧密相连.从水利工程中的大坝建设到土建施工中的给水、排水、采暖、通风;从机械工业中的液压传动、润滑冷却到动力工程中的各类热工机械;从金属冶炼中金属的熔融到石化工业中油、气、水的流动;从飞机、导弹在空中的飞行到船舶、潜艇在水中的航行;从海洋中的波浪、潮汐到大气环流,只要涉及流体的流动和流体与固体的相互作用,都离不开流体力学的知识.因此,流体力学在水利、机械、动力、化工、石油、土建、冶金、航空、航海、气象、环境等工程技术中,都有广泛的应用.在这些专业中,都把流体力学作为主干技术基础课程.

长期以来,我国高等教育受计划经济影响,专业划分过细.与此相对应,已有的工科类流体力学教材大多是围绕各专业需要分别编写的,课程体系过分强调为专业服务,对流体力学的基本理论和基本方法介绍不够.随着我国经济体制由计划经济向社会主义市场经济转变,各高校纷纷拓宽专业口径,减少专业设置,加强对学生基本理论的教育和创新能力的培养.本教程正是为适应我国高等教育的这一历史性转变而编写的,力求反映“高等教育面向 21 世纪教学改革计划”的成果,与国际上流体力学的发展趋势一致,做到突出重点、强化基础、联系实际、学以致用.其特点是:

1. 突出流体力学三种基本分析方法(即控制体分析、微分分析、量纲分析)的介绍.让读者通过举一反三,掌握流体力学的基本分析方法和基本理论.

2. 采用知识点互补对比的编排方式.即通过黏流与无黏流、内部流动与外部流动、可压缩流与不可压缩流等内容的对比分析,使读者对各种流态的条件、特点以及流动规律有较深入的了解,为应用这些基本理论分析、解决实际问题打下基础.

3. 将简单的工程应用实例穿插进教学内容.让读者得到分析、计算工程问题的训练,培养工程应用能力.

4. 将应用计算机求解流体力学问题引入教学内容.除专门列出一章简单介绍计算流体力学的方法外,还在其他章节内穿插一些计算机解题框图,使读者受到用计算机求解流体力学问题的基本训练,提高计算机应用能力.

本书由归柯庭(第三,四,六,七章)、汪军(第八,九,十章)、王秋颖(第一,二,五章)编写,由归柯庭统稿.南京理工大学袁亚雄教授详细审阅了本书并提出了许多宝贵意见,在此深表谢意.

限于编者水平,书中肯定有错误和不妥之处,恳请读者批评指正.

编 者

目 录

第一章 流体及其物理性质	1
1.1 流体的定义和特征.....	1
1.2 流体力学发展简史.....	2
1.3 流体的连续介质假设.....	3
1.4 国际单位制.....	4
1.5 流体的密度.....	5
1.6 流体的压缩性和膨胀性.....	9
1.7 流体的黏性.....	12
1.8 液体的表面张力.....	20
习题一	23
第二章 流体静力学	25
2.1 作用在流体上的力.....	25
2.2 流体平衡微分方程式.....	28
2.3 流体静力学基本方程式.....	31
2.4 液柱式测压计.....	35
2.5 流体在非惯性坐标系中的相对平衡.....	41
2.6 静止流体对壁面的压力.....	48
习题二	58
第三章 流体流动特性	65
3.1 流场及其描述方法.....	65
3.2 流体流动的速度场.....	66
3.3 流体微团的运动分析.....	72
3.4 黏性流体的流动形态.....	78
3.5 流体流动分类.....	80
习题三	84
第四章 流体动力学分析基础	86
4.1 系统与控制体.....	86

4.2	雷诺输运定理.....	87
4.3	流体流动的连续性方程.....	90
4.4	理想流体的能量方程.....	92
4.5	不可压缩理想流体一维流动的伯努利方程及其应用.....	94
4.6	动量定理	100
4.7	角动量定理	106
4.8	微分形式的守恒方程	113
4.9	定常欧拉运动微分方程的积分求解	125
	习题四.....	129
第五章	量纲分析与相似原理.....	136
5.1	量纲分析	136
5.2	相似原理	143
5.3	模型试验	149
	习题五.....	155
第六章	不可压缩黏性流体的内部流动.....	157
6.1	流动阻力	157
6.2	圆管内层流	161
6.3	平板间的层流	165
6.4	管内湍流	174
6.5	沿程阻力系数和局部阻力系数	183
6.6	管内流动的能量损失	190
6.7	管路计算	202
	习题六.....	213
第七章	不可压缩黏性流体的外部流动.....	218
7.1	边界层	218
7.2	绕平板流动边界层的近似计算	224
7.3	绕曲面流动及边界层的分离	237
7.4	黏性流体绕小圆球的蠕流流动	242
7.5	黏性流体绕流物体的阻力	250
	习题七.....	253
第八章	不可压缩流体的无黏流动.....	255
8.1	速度环量	255
8.2	流函数与速度势	262
8.3	基本平面势流	265

8.4	基本平面势流的简单叠加	271
8.5	平行流绕圆柱体的流动	277
	习题八.....	285
第九章	可压缩流体的流动.....	286
9.1	音速与马赫数	286
9.2	气体一维定常等熵流动	290
9.3	喷管中的等熵流动	295
9.4	有摩擦的绝热管流	300
9.5	超音速气流的绕流与激波的形成	304
9.6	激波前后气流参数的关系	309
9.7	喷管在非设计工况下的流动	316
	习题九.....	319
第十章	计算流体力学简介.....	321
10.1	离散化方法.....	321
10.2	流动问题数值求解例.....	327
	参考答案.....	335
	参考文献.....	339
	中英文术语对照表.....	341

第一章 流体及其物理性质

从生产到生活,流体与我们密切相关.自然界中,从包围着整个地球的大气到江河湖海中的水,都是流体.可以说,人类生活在一个被流体包围着的世界里.流体力学是力学的一个分支.它专门研究流体在静止和运动时的受力情况与运动规律,研究流体在静止和运动时的压强分布、流速变化、流量大小、能量损失以及与固体壁面之间的相互作用力等问题.为了全面、透彻地理解这些流体力学的基本知识,本章首先介绍流体的定义和物理性质以及用于流体力学研究的基本简化假定.包括:流体的三大特性——易流动性,可压缩性和黏性;流体的连续介质假设;气液相接触时的表面特性等.

1.1 流体的定义和特征

流体是能流动的物质.从其力学特征看,流体是一种受任何微小剪切力都能连续变形的物质.固体则不同,当受到剪切力作用时,仅产生一定程度的变形,只要作用力保持不变,固体的变形也就不再变化.由此可见,易流动(易变形)性是流体的一大特征.

流体和固体具有上述不同性质是由于分子结构和分子间的作用力不同造成的.流体分子间的作用力小,分子运动强烈,从而决定了流体具有易流动,不能保持一定形状的特性.

流体按其状态不同又可分为液体和气体.液体和气体除具有上述的共同特性外,还有以下不同特性:

气体的分子间距较大,在 0°C 、1 个标准大气压下,气体的平均分子距约为 $3.3 \times 10^{-9} \text{ m}$,其分子平均直径约为 $2.5 \times 10^{-10} \text{ m}$,分子距比分子平均直径约大 10 倍.因此分子间的吸引力很小,气体分子可以自由运动,故它极易变形和流动.此外气体没有一定的体积,也没有一定的形状,总是充满容纳它的容器.

液体的分子间距和分子的有效直径差不多相等,为气体分子距的十分之一左右,故分子间的吸引力较大,所以,液体分子不能像气体分子那样自由运动,液体的流动性不如气体.此外,液体具有一定的体积,并取容器的形状.当容器的容积大于

液体的体积时,液体不能充满容器,在重力的作用下,液体总保持一个自由表面(液面)。

1.2 流体力学发展简史

和许多其他学科一样,流体力学的发展经历了漫长的岁月.人类最早对流体的认识是从供水、灌溉、航行等方面开始的.远在二、三千年前,在同自然界的长期斗争中,人们已经开始建造了水利工程和最简单的水利机械.例如,在我国战国时代,李冰父子修建了都江堰水利工程,用于防洪和灌溉;隋朝时开凿了贯通中国南北,北起涿郡(北京),南至余杭(杭州)的大运河,对构造南北交通发挥了巨大作用;此外,古代还发明了一些以水力为动力的简单机械,用作碾米磨面等.由于没有相应的数学和机械知识,那时关于流体的认识,只是些从实践中总结出来的经验性的东西.然而,正是这些经验的积累,为流体力学的发展奠定了基础.

流体力学的最早文献中记载着阿基米德(Archimedes).他是古希腊的数学家和发明家,在公元前 250 年就发表了《论浮体》一文,精确地给出了“阿基米德定律”,从而奠定了物体平衡和沉浮的理论基础.文献中还记载着罗马人在公元前 4 世纪至公元 1 世纪修筑的复杂的水利系统.但在其后的 1000 多年中,即在漫长的中世纪,流体力学研究几乎没有新的进展.

15 世纪初,流体力学研究的又一次繁荣是伴随着欧洲的文艺复兴而兴起的.其中有代表性的是伽俐略(Galilei)的实验,它标志着实验流体力学的开始.到了 18 世纪,由于欧洲资本主义蓬勃兴起,自然科学的发展突飞猛进,流体力学也有了长足进步.流体力学的最基本、最主要的理论都在这时期建立起来了,并涌现出一批杰出人物,他们为流体力学的发展做出了巨大的贡献.其中包括牛顿(Newton)、伯努利(Bernoulli)、欧拉(Euler)和达朗贝尔(D'Alembert)等.此外,这一时期实验流体力学也发展迅速.但遗憾的是,在这以后,流体力学两种不同的研究方法——理论和实验方法,沿着两个不同的方向各自发展起来.流体动力学(Hydrodynamics)是从理论上或数学上研究理想的、无摩擦的流体运动.它将流体及其受力条件理想化,忽略次要因素,建立描写流体运动的方程式.在这方面最具代表性的是瑞典科学家伯努利于 1738 年建立的能量方程.水力学(Hydraulics)是从实际应用或实验方面研究真实流体运动,特别是水的运动.由于流动的复杂性,对尚不能从理论上解决而工程实际应用中又经常遇到的问题,采取实验先行的办法.对理论不足部分反复实验,总结规律,得到经验公式和半经验公式.在这方面具代表性的是尼古拉兹(Nikuradse)实验曲线、穆迪(Moody)图等.19 世纪流体动力学和实验水力学进一步发展,因而更具科学性.一些描述流体运动的基本方程式以及当时验证的一些

实验结果至今仍在使用。

20 世纪初,在流体动力学和实验水力学空前发展的条件下,人们试图将二者统一.1904 年,德国数学家普朗特(Prandtl)发表了一篇著名的论文,在论文中他引入了流体边界层的概念,为流体力学理论和实验的统一奠定了基础.普朗特的观点是:在流体接近固体边界的一薄层内(边界层),摩擦力起主要作用;在边界层以外,流体运动更像无摩擦的理想流体.这个相当简单的概念为实现流体动力学和实验水力学的统一提供了条件.所以人们称普朗特为现代流体力学之父.

在 20 世纪的第一个 10 年间,空中飞行的成功,使空气动力学引起人们极大的兴趣.因为设计飞行器要求对流体流动有一定程度的了解,并能预测空气流动对它的作用.空气动力学为流体力学在 20 世纪迅速发展开辟了新的道路.

从流体力学的发展过程可看出,它的产生和发展,始终是与社会生产实践紧密地联系在一起的.在现代科学技术高度发展的情况下,随着电子计算机的出现,计算技术被引入流体力学领域,使以前因计算过于繁杂而影响进一步探讨的流体力学问题逐步得以解决,计算流体力学在今天已成为研究流体力学的重要方法.近年来,流体力学与其他学科相互渗透,形成了许多边缘学科.例如生物流体力学、地球流体力学、化学流体力学、液压流体力学、电磁流体力学、高温气体动力学、两相流体力学、流变学等.这些新型学科的出现和发展,使流体力学这一古老学科更富有活力.

1.3 流体的连续介质假设

从微观角度看,流体和其他物质一样,都是由大量分子组成的,分子之间存在着间隙,因此,流体并不是连续分布的物质.但是,流体力学所要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流体的宏观运动.

流体的宏观运动由大量分子运动的统计平均值来体现.正因为如此,在流体力学中,取流体质点来代替流体的分子作为研究流体的基元.所谓流体质点是一块体积为无穷小的微量流体.流体质点虽小,但却包含有为数众多的分子,因而它能反映大量分子运动的统计平均值.所以从微观角度看,流体质点应为无穷大.另一方面,流体质点在宏观上应为无穷小,即与所研究的整个流动空间相比,流体质点应是无穷小,应能通过流体质点及其所属物理量在空间的变化来反映流体的运动.所以流体质点简单来说就是宏观无穷小,微观无穷大的微量流体.对于流体质点而言,我们假定它们之间没有间隙,在空间连续分布.所以将流体视为由无数连续分布的流体质点所组成的连续介质,这就是流体的连续介质假设.

把流体看成是由连续介质组成的物质,即由微观无穷大、宏观无穷小的流体质

点组成的连续介质,流体质点间没有空隙地、连续地充满其所在的空间.这样,只要我们在研究流体运动时所取的质点足够小,但它包含了足够多的分子,从而使各个物理量的统计平均值有意义,我们就可以不去研究无数分子的瞬时状态,而只研究由流体质点代表的描述流体宏观运动的某些属性.此外,将流体视为连续介质来处理,则表征流体宏观属性的物理量例如密度、速度、压强、温度、黏度、应力等在流体中也是连续变化的.这样,可将流体及其各物理量看作是时间和空间坐标的单值连续可微函数,从而可以利用微分方程等数学工具来研究流体的平衡和运动规律.

连续介质假设是流体力学的根本假设之一,我们依据了这个假设,才能把微观问题转化为宏观问题来处理.对于大部分工程技术中的流体力学问题,该假设都是适用的.例如在标准状况下, 1mm^3 的气体中有 2.7×10^{16} 个分子,若取 0.01mm 作为流体质点的特征尺寸,则在体积为 10^{-6}mm^3 的流体质点中,还包含有 2.7×10^{10} 个分子,完全能得到与个别分子运动无关的统计平均值.另一方面 0.01mm 相对于一般工程问题又是一个非常小的量,完全可以将其视为是一宏观无穷小量.但对一些特殊问题,该假设不适用.例如,火箭在高空非常稀薄的气体中飞行以及高真空技术中,由于分子间距与有效尺寸到了可以比拟的程度,就必须舍弃宏观的连续介质的研究方法,代之以分子动力论的微观方法.本书只研究连续介质的运动规律.

1.4 国际单位制

单位,是人为赋予的比较同类物理量大小的符号.

在我们日常生活中,会碰到各种单位制,英美的尺-磅-秒制(f-p-s制),物理上用的厘米-克-秒制(cm-g-s制)以及工程技术上采用的米-千克(公斤力)-秒制(m-kg-s制)等.随着世界科学技术的迅猛发展,国际交流日益频繁,迫切需要一个可应用于各个领域的统一的单位制,来替代旧的各种单位制.1960年第11届国际计量大会通过了国际单位制,“SI”为其国际符号.它是在米制基础上发展起来的比较完善、科学、实用的单位制,目前绝大多数国家都已宣布采用.1977年我国国务院及教育部都已先后指示应在教材中逐步采用国际单位制.所以本书采用国际单位制.

国际单位制有7个基本单位,见表1-1,其他物理量的单位均可由这7个基本单位导出,称为导出单位.例如,速度的单位(m/s)可用距离的单位(m)除以时间的单位(s);密度的单位 kg/m^3 可用质量的单位(kg)除以体积单位(m^3).有些SI导出单位具有专门名称,例如力的单位可按牛顿第二定律 $F=ma$ 导出,因而力可由质量的单位(kg)和加速度单位(m/s^2)的乘积($\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$)表示,它的专门名称是牛顿,用符号N表示.SI制中常用的工程流体力学单位见表1-2.

表 1-1 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克[公斤]	kg
时间	秒	s
电流	安[培]	A
物质的量	摩[尔]	mol
热力学温度	开[尔文]	K
发光强度	坎[德拉]	cd

在应用 SI 单位制时,在不同的科学领域内,有可能对同一物理量使用的单位尺度相差万千倍,因而允许有些单位在规定的基礎上再增加倍单位和分单位.采用在主单位的符号前加上词冠,组成分单位或倍单位的符号.例如,“mm”表示 10^{-3} 米,即毫米.SI 制的词冠列于表 1-3.

除国际单位制外,一些过去曾使用过的单位制,在某些地区、某些场合还会继续使用一段时间.表 1-4 列出与国际单位制并用的某些单位.

在目前 SI 制还没有完全替代其他单位制的情况下,尤应注意各种单位制之间的换算,本书中的题解,其单位都用 SI 制表示.

1.5 流体的密度

1.5.1 流体的密度

流体的密度是流体的重要属性之一,它所表征的是流体在空间某点质量的密集程度.若某点的体积为 δV ,其中的流体质量为 δm ,则该点的密度

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

式中 ρ 表示单位体积流体所具有的质量(kg/m^3).

这里 $\delta V \rightarrow 0$,应从物理上理解为体积缩小为无穷小的流体质点,从宏观角度看,该点的体积同整个流场的流体体积相比是完全可以忽略不计的;但从微观角度

表 1-2 常用的工程流体力学单位

量	符号	类别	单位名称	SI		用基本单位表示
				中文代号	国际代号	
长度	L	基本单位	米	米	m	m
质量	m		千克	千克	kg	kg
时间	t		秒	秒	s	s
热力学温度	T		开尔文	开	K	K
角度	θ	导出单位	弧度	弧度	rad	
力	F		牛顿	牛	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
压强	p		帕斯卡	帕	Pa	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
切应力	τ		牛顿每平方米	牛/米 ²	N/m ²	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面张力系数	σ		牛顿每米	牛/米	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
力矩	M		牛顿米	牛·米	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
动量	mv		牛顿米每秒	牛·米/秒	N·m/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
动力黏度	μ		帕秒	帕·秒	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
运动黏度	ν		平方米每秒	米 ² /秒	m ² /s	$m^2 \cdot s^{-1}$
密度	ρ		千克每立方米	千克/米 ³	kg/m ³	$m^{-3} \cdot kg$
功(能)	W		焦耳	焦	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
功率	P		瓦特	瓦	W	$m^3 \cdot kg \cdot s^{-3}$
面积	S		米平方	米 ²	m ²	m ²
体积	V		米立方	米 ³	m ³	m ³
速度	v		米每秒	米/秒	m/s	$m \cdot s^{-1}$
角速度	ω		弧度每秒	弧度/秒	rad/s	
加速度	a		米每秒平方	米/秒 ²	m/s ²	$m \cdot s^{-2}$
流量	Q		立方米每秒	米 ³ /秒	m ³ /s	$m^3 \cdot s^{-1}$

表 1-3 SI 制词冠

因数	词冠	代号		因数	词冠	代号	
		国际	中文			国际	中文
10^{18}	艾克萨(exa)	E	艾	10^{-1}	分(dec)	d	分
10^{15}	拍它(peta)	P	拍	10^{-2}	厘(centi)	c	厘
10^{12}	太拉(tera)	T	太	10^{-3}	毫(mili)	m	毫
10^9	吉(giga)	G	吉	10^{-6}	微(micro)	μ	微
10^6	兆(mega)	M	兆	10^{-9}	纳诺(nano)	n	纳(毫微)
10^3	千(kilo)	k	千	10^{-12}	皮可(pico)	p	皮(微微)
10^2	百(hect)	h	百	10^{-15}	飞母托(femto)	f	飞
10^1	十(deca)	da	十	10^{-18}	阿托(atto)	a	阿

表 1-4 与国际单位制并用的单位

量	单位名称	代号	折合成 SI 制
时间	分	min	=60 s
	时	h	=3600 s
	日	d	=86400 s
平面角	度	°	$=\frac{\pi}{180}\text{rad}$
	分	'	$=\left[\frac{1}{60}\right]^\circ = \frac{\pi}{10800}\text{rad}$
	秒	"	$=\left[\frac{1}{60}\right]' = \frac{\pi}{648000}\text{rad}$
体积(容积)	升	l	$=10^{-3}\text{m}^3$
质量	吨	t	$=10^3\text{kg}$

看, δV 内必须包含足够多的分子, 而不失去把流体当作连续介质处理的基础。

假如流体是均匀的, 那么流体密度为

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

式中 m 为流体的质量(kg), V 为流体的体积(m^3)。

表 1-5 列出了水、空气和水银这三种最常用流体在标准大气压下不同温度时

的密度.表 1-6 列出了在标准大气压下几种常用流体的密度.

表 1-5 不同温度时水、空气和水银的密度/(kg/m³)

流体名称	温度/°C						
	0	10	20	40	60	80	100
水	999.87	999.73	998.23	992.24	983.24	971.83	958.37
空气	1.29	1.24	1.2	1.12	1.06	0.99	0.94
水银	13600	13570	13550	13500	13450	13400	13350

表 1-6 常用流体的密度

流体名称	温度/°C	密度/(kg/m ³)	流体名称	温度/°C	密度/(kg/m ³)
水	4	1000	氧气	0	1.429
海水	15	1020~1030	氮气	0	1.251
润滑油	15	890~920	氢气	0	0.0899
酒精	15	790~800	烟气	0	1.34
水银	0	13600	二氧化碳	0	1.976
水蒸气	0	0.804	一氧化碳	0	1.25
空气	0	1.293	二氧化硫	0	2.927

1.5.2 流体的相对密度

工程上,流体的相对密度通常是指某流体的密度与标准大气压下 4°C 时纯水的密度之比,用 S 表示.即

$$S = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (1-3)$$

式中 ρ 为流体的密度(kg/m³), ρ_w 为 4°C 时水的密度(kg/m³).

在以前的教科书上,常将流体的重量与标准大气压下 4°C 时纯水的重量之比,定义为流体的比重.可见,流体的比重与相对密度是同一概念.

1.5.3 流体的比体积

流体密度的倒数称为比体积,即单位质量的流体所占有的体积,用 v 表示.

$$v = 1/\rho \quad (1-4)$$

它的单位为 m³/kg.

1.5.4 混合气体的密度

混合气体的密度可按各组分气体所占体积百分数计算,即

$$\rho = \rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2 + \cdots + \rho_n \alpha_n = \sum_{i=1}^n \rho_i \alpha_i \quad (1-5)$$

式中 ρ_i 为混合气体中各组分气体的密度, α_i 为混合气体中各组分气体所占的体积百分数. ($i=1, 2, \dots, n$)

例 1-1 已经测得锅炉烟气各组分气体的体积百分数分别为 $\alpha_{\text{CO}_2} = 13.6\%$, $\alpha_{\text{SO}_2} = 0.4\%$, $\alpha_{\text{O}_2} = 4.2\%$, $\alpha_{\text{N}_2} = 75.6\%$, $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 6.2\%$, 试求烟气的密度

解 由表 1-6 查得在标准状态下 $\rho_{\text{CO}_2} = 1.98 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{SO}_2} = 2.93 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{O}_2} = 1.43 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{N}_2} = 1.25 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0.804 \text{ kg/m}^3$. 将已知数值代入式(1-5), 得烟气在标准状态下的密度.

$$\begin{aligned} \rho &= 1.98 \times 0.136 + 2.93 \times 0.004 + 1.43 \times 0.042 + 1.25 \times 0.756 + 0.804 \times 0.062 \\ &= 1.34 (\text{kg/m}^3) \end{aligned}$$

1.6 流体的压缩性和膨胀性

1.6.1 流体的压缩性

在一定的温度下, 流体的体积随压强升高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 来表示, 它表示当温度保持不变时, 单位压强增量所引起的流体体积变化率, 即

$$\beta_p = - \frac{1}{V} \frac{\delta V}{\delta p} \quad (1-6)$$

式中 β_p 为流体的体积压缩系数 (m^2/N); δp 为流体压强的增加量 (Pa); V 为流体原有的体积 (m^3); δV 为流体体积的缩小量 (m^3).

由于压强增加时, 流体体积减小, δp 与 δV 异号, 故在上式右侧加负号, 以使体积压缩系数 β_p 永为正值. 式(1-6)表明, 对于同样的压强增量, β_p 值大的流体, 其体积变化率大, 较易压缩; β_p 值小的流体, 其体积变化率小, 较难压缩. 在一定温度下水的体积压缩系数与压强的关系列于表 1-7. 由表中可见, 水的 β_p 值很小, 即它的压缩性很小.

表 1-7 0°C 水的体积压缩系数

p/MPa	0.49	0.98	1.96	3.92	7.85
$\beta_p/(10^{-9} 1/\text{Pa})$	0.539	0.537	0.531	0.523	0.515

气体的 β_p 可由状态方程 ($T = \text{常数}$) 求得

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{d}{dp} \left[\frac{mRT}{p} \right] = -\frac{mRT}{V} \left[-\frac{1}{p^2} \right] = \frac{1}{p} \quad (1-6a)$$

上式说明气体的 β_p 与 p 成反比, 压强越高, β_p 越小, 压缩越困难. 反之, 压强低时容易被压缩.

体积压缩系数的倒数称为体积模量, 用 K_p 表示

$$K_p = \frac{1}{\beta_p} = -\frac{V \delta p}{\delta V} \quad [\text{N/m}^2 \text{ 或 Pa}] \quad (1-7)$$

工程上常用体积模量去衡量流体压缩性的大小. 显然, K_p 值大的流体的压缩性小, K_p 值小的流体的压缩性大. K_p 的单位与压强单位相同.

1.6.2 流体的膨胀性

在一定的压强作用下, 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温度膨胀系数 β_T 来表示. 它表示当压强不变时, 单位温升所引起的流体体积变化率, 即

$$\beta_T = \frac{\delta V/V}{\delta T} = \frac{\delta V}{V \delta T} \quad (1-8)$$

式中 β_T 为流体的温度膨胀系数 ($1/^\circ\text{C}$ 或 $1/\text{K}$); δT 为流体温度的增加量 ($^\circ\text{C}$ 或 K); V 为流体原有的体积 (m^3); δV 为流体体积的增加量 (m^3).

由于温度升高, 体积膨胀, 故 δT 与 δV 同号. 实验指出, 液体的温度膨胀系数很小, 例如, 在 $9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$ 下, 温度在 $1 \sim 10^\circ\text{C}$ 范围内, 水的温度膨胀系数 $\beta_T = 14 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. 在常温下, 温度每升高 1°C , 水的体积相对增量仅为万分之一点五, 其他液体的 β_T 也是很小的. 在 101325 Pa 时 (一个大气压下), 水的温度膨胀系数与温度的关系如表 1-8 所示.

表 1-8 101325 Pa 时水的温度膨胀系数 β_T

温度/ $^\circ\text{C}$	1~10	10~20	45~50	60~70	90~100
$\beta_T/(1/^\circ\text{C})$	0.14×10^{-4}	1.50×10^{-4}	4.22×10^{-4}	5.56×10^{-4}	7.19×10^{-4}

气体的膨胀系数可由状态方程($p = \text{常数}$)求得

$$\beta_T = \frac{\delta V/V}{\delta T} = \frac{1}{V} \frac{d}{dT} \left(\frac{mRT}{p} \right) = \frac{mR}{Vp} = \frac{1}{T} \quad (1-8a)$$

上式说明,气体的 β_T 与 T 成反比.当 $T = 273\text{K}$ 时, $\beta_T = \frac{1}{273}$.这实际上就是盖-吕萨克(Gay-Lussac)定律:在等压过程中,温度每升高 1K ,气体膨胀原体积的 $1/273$.

例 1-2 体积为 5m^3 的水,在温度不变的条件下,压强从 $9.8 \times 10^4 \text{Pa}$ 增加到 $4.9 \times 10^5 \text{Pa}$,体积减小 $1 \times 10^{-3} \text{m}^3$,求水的体积模量 K_p .

解 由式(1-7)得

$$K_p = - \frac{\delta p}{\delta V/V} = - \frac{(4.9 - 0.98) \times 10^5}{(-1 \times 10^{-3})/5} = 1.96 \times 10^9 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

1.6.3 可压缩流体和不可压缩流体

流体的膨胀系数和压缩系数全为零的流体叫不可压缩流体.实际上任何流体,不论是液体还是气体,都是可以压缩的,不可压缩流体并不存在.但为了研究问题方便,人们提出了不可压缩流体的概念.流体受压体积不减少,受热体积不膨胀,那么其密度为常数.或者可以这样讲,密度保持为常数的流体叫不可压缩流体.这样,在讨论流体的平衡和运动规律时就简单了.

液体的压缩性很小,随着压强和温度的变化,液体的密度仅有微小的变化.在多数情况下,可以忽略压缩性的影响,认为液体的密度是常数.于是通常把液体看成是不可压缩的流体.

气体的压缩性都很大.从热力学中可知,当温度不变时,完全气体(热力学中的理想气体在这里称为完全气体,以便与无黏性的理想流体相区别)的体积与压强成反比,压强增加一倍,体积减小为原来的一半;当压强不变时,温度升高 1°C ,体积就比 0°C 时的体积膨胀 $1/273$.所以,通常把气体看成是可压缩流体,即它的密度不能作为常数,而是随着压强和温度的变化而变化的.

在工程实际中,要不要考虑流体的压缩性,要视具体情况而定,例如,在水击现象和水下爆炸时,水中的压强变化较大,而且变化过程非常迅速,这时水的密度变化就不可以忽略,即要考虑水的压缩性,把水当作可压缩流体来处理;在气体流速不高,压强变化较小的场合,则可以忽略压缩性的影响,把气体视为不可压缩流体.例如,在一个标准大气压下,当空气的流速等于 68m/s 时,密度的相对变化约为 1% ,这在工程计算中一般是可以忽略的.

1.7 流体的黏性

1.7.1 流体黏性的例子

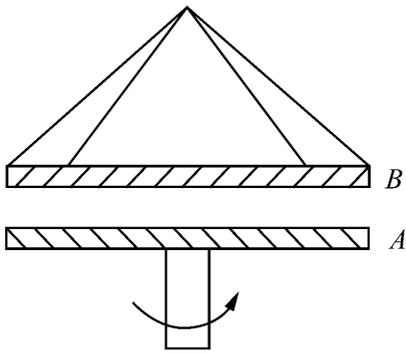


图 1-1 黏性的例子

流体的黏性是指流体质点运动发生相对滑移时产生切向阻力的性质,是流体的另一大特性.为了增强对流体黏性的感性认识,让我们先观察一个现象.如图 1-1 所示,圆盘 B 通过金属丝悬挂在圆盘 A 上面. A 盘和 B 盘都浸在某种液体中. A 、 B 之间保持一定距离.马达开动后, A 盘开始转动.可以发现, B 盘也随 A 盘转动,当转到一定角度时就不再转动了.此时,使 B 盘扭转的力矩与金属丝给予 B 盘的反向扭力矩正好平衡.当马达停止转动后, B 盘将回复到原来位置,金属丝的扭转也随之消失.

A 盘与 B 盘没有直接接触,为什么 B 盘会随着 A 盘转动呢? 因为 A 、 B 盘与液体接触的面上都附着一层薄薄的液体,称为贴壁边界层.当 A 盘转动时, A 盘上边界层将随 A 盘以同样的速度转动.但紧靠着 A 盘边界层外的一层流体原来是静止的,此时与边界层之间出现了速度差,速度大的就带动速度小的流体层.这样由下至上层一层地带动,直到把 B 盘也带动起来.

当流体中发生了层与层之间的相对运动时,速度快的层对速度慢的层产生了一个拖动力使它加速,而速度慢的流体层对速度快的就有一个阻止它向前运动的阻力.拖动力和阻力是大小相等方向相反的一对力,分别作用在两个紧挨着,但速度不同的流体层上,这就是流体黏性的表现,称为内摩擦力或黏性力.所以流体的黏性指的是当流体层间发生相对滑移时产生切向阻力的性质,是流体在运动状态下具有抗拒剪切变形,阻碍流体流动的能力.为了维持流体的运动,就必须消耗能量来克服由黏性产生的能量损失.

1.7.2 牛顿内摩擦定律

流体运动时的黏性力与哪些因素有关? 牛顿经过大量的实验研究,于 1686 年提出了确定黏性力的“牛顿内摩擦定律”.

如图 1-2 所示,取两块相互平行的平板.假设它们相距 h ,其间充满着流体,上板以 U 的速度沿 x 轴方向运动,下板静止不动.由于黏性,流体将黏附于它所接触的流体表面.与上板接触的流体将以 U 的速度运动,而与下板接触的流体则静止不动.它们中间的流体作平行于板的运动,且其速度均匀地由下板的零变化到上板

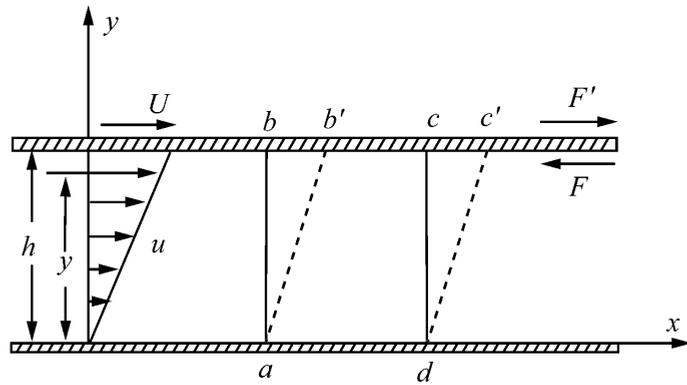


图 1-2 流体黏性实验示意图

的 U . 可见, 各流层之间都有相对运动, 因而必定产生切向阻力(内摩擦阻力). 要维持这种运动, 必须在上板施加与内摩擦阻力 F 大小相等而方向相反的切向力 F' .

实验证明流体内摩擦阻力的大小与速度 U 成正比, 与接触面积成正比, 而与两板之间的距离成反比, 可以写成

$$F = \mu A U / h \quad (1-9)$$

式中 F 为内摩擦力(N); A 为流体与平板接触面积(m^2); h 为运动平板与静止平板间的垂直距离(m); U 为运动平板的移动速度(m/s); μ 为与流体性质及温度、压强有关的比例系数, 称为动力黏度或黏度($\text{Pa}\cdot\text{s}$ 或 $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 或 $(\text{N}\cdot\text{s})/\text{m}^2$).

单位面积上的摩擦阻力称为切向应力, 用 τ 表示

$$\tau = \mu U / h \quad (\text{Pa}) \quad (1-10)$$

一般情况下, 流体流动的速度并不按直线变化. 如图 1-3 所示, 取一厚度为 dy 的无限薄的流体层, 坐标 y 处流体流速为 u , 坐标 $y+dy$ 处的流速为 $u+du$. 显然在厚度为 dy 的薄层中速度梯度为 $\frac{du}{dy}$. 则切应力为

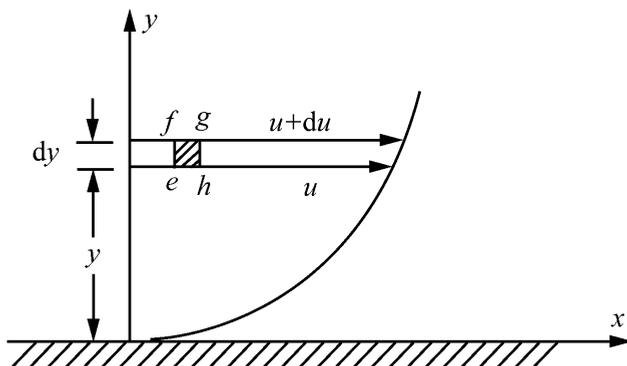


图 1-3 黏性流体速度分布示意图

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-11)$$

式中 $\frac{du}{dy}$ 为垂直于流动方向上的速度梯度(1/s)。

这就是牛顿内摩擦定律的数学表达式。它的物理意义是：作用在流层上的切向应力与速度梯度成正比，其比例系数为流体的动力黏度。

当 $\frac{du}{dy} = 0$ ，即两层流体相对静止时， $\tau = 0$ ，不存在内摩擦力。显然，流体的内摩擦定律与两固体之间的摩擦定律大不相同。前者摩擦力与速度成正比，而与压强关系甚微。后者与速度的关系甚微，而与两固体间的压强成正比。

1.7.3 动力黏度

式(1-11)可改写成

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

由式(1-12)可知， μ 表示当速度梯度为 1 时单位面积上摩擦力的大小。 μ 值越大，流体的黏性也越大。

工程计算中常采用动力黏度与密度的比值，称为运动黏度，用 ν 表示，其单位为 m^2/s 。

$$\nu = \mu/\rho \quad (1-13)$$

流体的黏度除了与流体的种类有关外，还与温度和压强有关。普通的压强对流体的黏度几乎没有影响，可以认为，流体的黏度只随温度变化。但在高压作用下，气体和液体的黏度均将随压强的升高而增大。例如，水在 10^{10} Pa 下的黏度可以增大到水在 10^5 Pa 下的黏度的二倍。

温度对流体黏度的影响很大。液体的黏度随着温度的上升而减小，气体的黏度随着温度的上升而增大。之所以会出现这种情况，是因为构成它们黏性的机理不同。液体分子间的吸引力是构成液体黏性的主要因素。当温度上升时，分子间的空隙增大，吸引力减小，所以液体的黏度下降。相反，气体分子间的吸引力是微不足道的，构成气体黏性的主要因素是气体分子作随机运动时，在不同流速的流层间所进行的动量交换。温度越高，气体分子的随机运动越强烈，动量交换越频繁，气体的黏度越大。

水的动力黏度与温度的关系，可用下列经验公式近似计算：

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + 0.0337 t + 0.000221 t^2} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (1-14)$$

式中 μ_0 为水在 0°C 时的动力黏度 $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$; t 为水温的摄氏度数 $(^\circ\text{C})$ 。

气体的动力黏度与温度的关系,可用下述经验公式近似计算:

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + K}{T + K} \left[\frac{T}{273} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (1-15)$$

式中 μ_0 为气体在 0°C 时的动力黏度 $(\text{Pa} \cdot \text{s})$; T 为气体的热力学温度 (K) ; K 为依气体种类而定的系数.式(1-15)只适用于压强不太高的场合,这时可视气体的黏度与压强无关.

水和空气的黏度列在表 1-9 中.气体在标准大气压下 0°C 时的黏度 μ_0 和系数 K 列于表 1-10,表 1-11 是常见气体在标准大气压下 20°C 时的物理参数.表 1-12 是标准大气压下常见液体的物理参数.

表 1-9 水与空气的黏度值

温度/ $^\circ\text{C}$	水		空气	
	$\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu/(\text{m}^2/\text{s})$	$\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu/(\text{m}^2/\text{s})$
0	1.792×10^{-3}	1.792×10^{-6}	0.0171×10^{-3}	13.7×10^{-6}
10	1.308×10^{-3}	1.308×10^{-6}	0.0178×10^{-3}	14.7×10^{-6}
20	1.005×10^{-3}	1.007×10^{-6}	0.0183×10^{-3}	15.7×10^{-6}
30	0.801×10^{-3}	0.804×10^{-6}	0.0187×10^{-3}	16.6×10^{-6}
40	0.656×10^{-3}	0.661×10^{-6}	0.0192×10^{-3}	17.6×10^{-6}
50	0.549×10^{-3}	0.556×10^{-6}	0.0196×10^{-3}	18.6×10^{-6}
60	0.469×10^{-3}	0.477×10^{-6}	0.0201×10^{-3}	19.6×10^{-6}
70	0.406×10^{-3}	0.415×10^{-6}	0.0204×10^{-3}	20.6×10^{-6}
80	0.357×10^{-3}	0.367×10^{-6}	0.0210×10^{-3}	21.7×10^{-6}
90	0.317×10^{-3}	0.328×10^{-6}	0.0216×10^{-3}	22.9×10^{-6}
100	0.284×10^{-3}	0.296×10^{-6}	0.0218×10^{-3}	23.6×10^{-6}

表 1-10 气体在 0°C 时的黏度 μ_0 和系数 K

气体名称	$\mu_0 / (\text{Pa}\cdot\text{s})$	K
空气	17.10×10^{-6}	111
水蒸气	8.93×10^{-6}	961
氧(O ₂)	19.20×10^{-6}	125
氮(N ₂)	16.60×10^{-6}	104
氢(H ₂)	8.40×10^{-6}	71
一氧化碳(CO)	16.80×10^{-6}	100
二氧化碳(CO ₂)	13.80×10^{-6}	254
二氧化硫(SO ₂)	11.60×10^{-6}	306

表 1-11 常见气体在标准大气压下 20°C 时的物理参数

气体名称	分子量	密度 ρ /(kg/m ³)	黏度 $\mu \times 10^6$ /(Pa·s)	气体常数 R /[J/(kg·K)]	定压比热容 C_p /[J/(kg·K)]	定容比热容 C_v /[J/(kg·K)]	绝热 系数 $k = C_p / C_v$
空气	29.0	1.205	1.80	287	1003	716	1.40
二氧化碳(CO ₂)	44.0	1.84	1.48	188	858	670	1.28
一氧化碳(CO)	28.0	1.16	1.82	297	1040	743	1.40
氦(He)	4.0	0.166	1.97	2077	5220	6143	1.66
氢(H ₂)	2.02	0.083	0.90	4120	14450	10330	1.40
甲烷(CH ₄)	16.0	0.668	1.34	520	2250	1730	1.30
氮(N ₂)	28.0	1.16	1.76	297	1040	743	1.40
氧(O ₂)	32.0	1.33	2.00	260	909	649	1.40
水蒸气(H ₂ O)	18.0	0.747	1.01	462	1862	1400	1.33

混合气体的动力黏度可用下列近似公式计算：

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i M_i^{\frac{1}{2}} \mu_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i M_i^{\frac{1}{2}}} \quad (1-16)$$

式中 α_i 为混合气体中 i 组分气体所占的体积百分数； M_i 为混合气体中 i 组分气体

的分子量； μ_i 为混合气体中 i 组分气体的动力黏度 ($i=1, 2, \dots, n$)。

表 1-12 标准大气压下常见液体的物理参数

液体	温度 /°C	密度 ρ /(kg/m ³)	相对密度 S	黏度 $\mu \times 10^4$ /(Pa·s)	表面张力 σ /(N/m)	蒸发压强 P_v /(kPa)
苯	20	895	0.90	6.5	0.029	10.0
四氯化碳	20	1588	1.59	9.7	0.026	12.1
原油	20	856	0.86	72	0.03	—
汽油	20	678	0.68	2.9	—	55
甘油	20	1258	1.26	14900	0.063	0.000014
氢	-257	72	0.072	0.21	0.003	21.4
煤油	20	808	0.81	19.2	0.025	3.20
氧	-195	1206	1.21	2.8	0.015	21.4
水银	20	13550	13.56	15.6	0.51	0.00017
水	20	998	1.00	10.1	0.073	2.34

1.7.4 牛顿流体和非牛顿流体

大量实验证明：大多数气体，水和许多润滑油类以及低碳氢化合物都能很好地遵循牛顿内摩擦定律，称这种流体为牛顿流体。当温度一定时，流体的黏度 μ 保持不变，即流体的内摩擦力与速度梯度的比例系数为常数。在 $\tau - \frac{du}{dy}$ 图上是一条通过原点、斜率为 μ 的直线，如图 1-4。

不服从牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体。此时内摩擦力 τ 和速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 并不是简单的直线关系。例如：塑性流体：它们有一个保持不产生剪切变形的初始应力 τ_0 ，克服 τ_0 后切应力 τ 才与 $\frac{du}{dy}$ 成正比

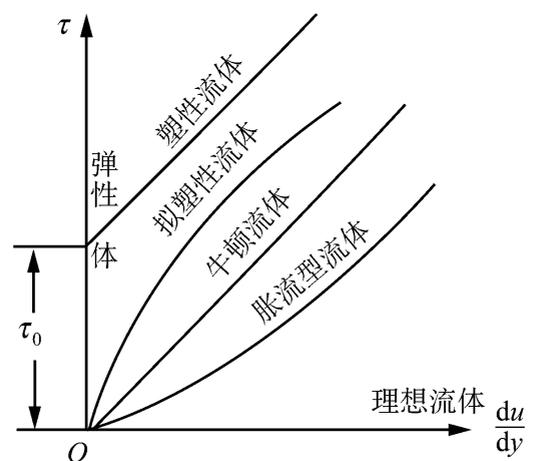


图 1-4 牛顿流体与非牛顿流体

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy} \quad (1-17)$$

凝胶、牙膏均属此类流体。

拟塑性流体：

$$\tau = K \left[\frac{du}{dy} \right]^n \quad (1-18)$$

式中 $n < 1$ ， K 为比例常数。在 $\tau - \frac{du}{dy}$ 图上曲线的斜率随 $\frac{du}{dy}$ 的增大而减小。油漆、纸浆液、高分子溶液等属此类流体。

胀流型流体：这类流体与拟塑性流体不同之处在于式(1-18)中 $n > 1$ ，即随着 $\frac{du}{dy}$ 的增大， $\tau - \frac{du}{dy}$ 曲线的斜率也增大。乳化液、油漆、油墨等属此类流体。

非牛顿流体在化工、轻工、食品等工业中常见，是流变学的研究对象。本书只讨论牛顿流体。

1.7.5 黏性流体和理想流体

黏度为零的流体称为理想流体。

在现实世界中，实际流体都是有黏性的，都是黏性流体。黏性的存在给流体运动的数学描述和处理带来很大困难。因此，在实际流体的黏性作用反映不出来的场合，用理想流体代替黏性流体，可化简求解过程。那么，在哪些情况下，实际流体的黏性作用反映不出来呢？

由牛顿内摩擦定律： $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ 可见，黏度相同的流体，速度梯度大，切向应力大；速度梯度小，切向应力小；没有速度梯度，切向应力为零，流体的黏性作用反映不出来。因此，当流体处于静止状态，或以相同的速度流动（即速度梯度为零）时，流体的黏性作用反映不出来，此时就可用理想流体代替。

而对一些速度梯度较小的场合，由于黏性的作用较弱，则可先将其视为理想流体处理，再对黏性的影响进行修正，使问题由繁变简。

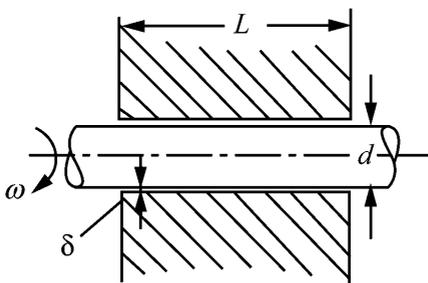


图 1-5 例 1-3 示意图

例 1-3 图 1-5 是滑动轴承示意图，直径 $d = 60\text{mm}$ ，长度 $L = 140\text{mm}$ ，间隙 $\delta = 0.3\text{mm}$ 。间隙中充满了运动黏度 $\nu = 35.28 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ ，密度 $\rho = 890\text{kg}/\text{m}^3$ 的润滑油。如果轴的转速 $n = 500\text{r}/\text{min}$ ，求轴表面摩擦阻力 F_f 和所消耗的功率 P 的大小。

解 假设间隙是同心环形，且 $\delta \ll d$ ，可将间隙中的速度分布 $u = u(r)$ 近似看成直线分布规律。轴

表面的速度梯度为

$$\frac{du}{dr} = \frac{r\omega}{\delta} = \frac{d}{2\delta} \cdot \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi dn}{60\delta}$$

$$\mu = \rho \cdot \nu = 890 \times 35.28 \times 10^{-6} = 3.14 \times 10^{-2} (\text{Pa} \cdot \text{s})$$

摩擦表面积为

$$A = \pi dL$$

根据牛顿内摩擦定律,作用在轴表面的摩擦阻力为

$$\begin{aligned} F_f &= A \cdot \mu \frac{du}{dr} = \pi dL \cdot \mu \cdot \frac{\pi dn}{60\delta} = \frac{\pi^2 d^2 Ln\mu}{60\delta} \\ &= \frac{3.14^2 \times 0.06^2 \times 0.14 \times 500 \times 3.14 \times 10^{-2}}{60 \times 0.3 \times 10^{-3}} \\ &= 4.33(\text{N}) \end{aligned}$$

摩擦所消耗的功率为

$$P = F_f r\omega = F_f \cdot \frac{d}{2} \cdot \frac{2\pi n}{60} = F_f \cdot \frac{\pi dn}{60} = 4.33 \times \frac{3.14 \times 0.06 \times 500}{60} = 6.8(\text{W})$$

例 1-4 某锅炉烟气各组分气体的体积百分数分别为 $\alpha_{\text{CO}_2} = 13.6\%$, $\alpha_{\text{SO}_2} = 0.4\%$, $\alpha_{\text{O}_2} = 4.2\%$, $\alpha_{\text{N}_2} = 75.6\%$, $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 6.2\%$, 烟气温度为 800°C , 试求其动力黏度。

解 从有关资料查得在 800°C 下, 各组分气体的黏度分别为

$$\mu_{\text{CO}_2} = 4.46 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\mu_{\text{SO}_2} = 3.71 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\mu_{\text{O}_2} = 5.02 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\mu_{\text{N}_2} = 4.23 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 4.26 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

各组分气体的分子量为 $M_{\text{CO}_2} = 44$, $M_{\text{SO}_2} = 64$, $M_{\text{O}_2} = 32$, $M_{\text{N}_2} = 28$, $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18$. 因此,

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i M_i^{\frac{1}{2}} \mu_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i M_i^{\frac{1}{2}}}$$

$$= 10^{-5} \frac{13.6 \times \sqrt{44} \times 4.46 + 0.4 \times \sqrt{64} \times 3.71 + 4.2 \times \sqrt{32} \times 5.02 + 75.6 \times \sqrt{28} \times 4.23 + 6.2 \times \sqrt{18} \times 4.26}{13.6 \times \sqrt{44} + 0.4 \times \sqrt{64} + 4.2 \times \sqrt{32} + 75.6 \times \sqrt{28} + 6.20 \times \sqrt{18}}$$

$$= 4.29 \times 10^{-5} \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$$

1.8 液体的表面张力

1.8.1 表面张力

当液体与其他流体或固体接触,出现自由表面时,液体的自由表面都呈现收缩的趋势,此表面像一个被均匀地张拉的薄皮那样处于应力状态.例如,把一根棉线拴在铁丝环上,然后把环浸到肥皂水里再拿出来,环上出现一层肥皂薄膜,见图 1-6(a).如果用针刺破棉线左侧的薄膜,则棉线会被右边的薄膜拉向右弯,见图 1-6(b).如果刺破右侧,则棉线会被左边的薄膜拉向左弯,见图 1-6(c).液体表面的这种收缩趋势是由液体的表面张力造成的.表面张力沿着液体的表面作用并且和液体的边界垂直.

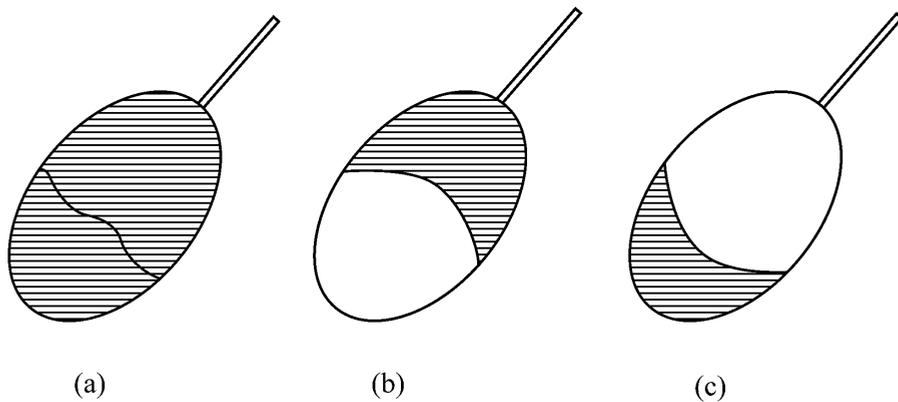


图 1-6 表面张力示意图

下面进一步分析上述现象的物理本质.液体分子之间是有吸引力的,分子间吸引力的作用半径 r 约为 $10^{-10} \sim 10^{-8} \text{ m}$.若流体内某分子距自由液面的距离大于或等于半径 r ,如图 1-7 中的 A 、 B 所示,则液体分子对该分子的吸引力刚好平衡.对分子 C ,由于自由表面上面的部分没有液体分子,则液体分子对分子 C 的吸引力上下不平衡,从而构成一个从自由液面向下作用的合力.对分子 D 来说,这种向下作用的合力达到最大.在厚度小于半径 r 的液面薄层内,所有液体分子均受向下的吸引力,把表面层紧紧地拉向液体内部.

既然表面层中的液体分子都受到指向液体内部的拉力作用,则任何液体分子在进入表面层时都必须反抗这种力的作用,也即都必须给这些分子以机械功.而这些机械功将以自由表面能的形式被储存起来.因此,自由表面的增加,便意味着自

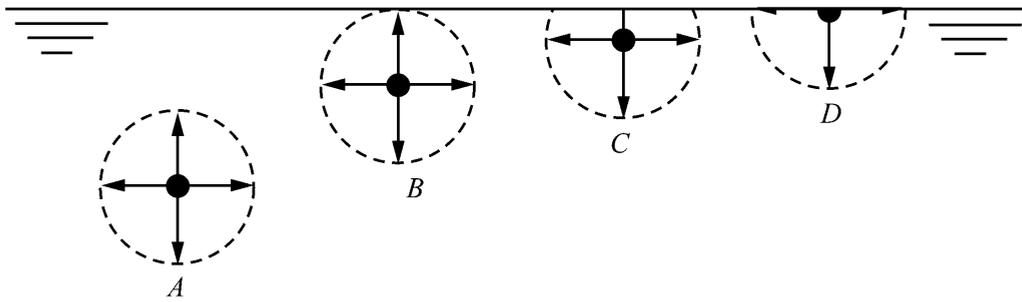


图 1-7 近液面的分子受到的平衡力与不平衡力

由表面能的增加.相反,自由表面的减少,便意味着自由表面能的减少,即它要向周围释放能量.因此,当自由表面收缩时,在收缩的方向上必定有力对自由表面做负功,也即作用力的方向与收缩的方向相反,这种力必定是拉力.在本节中,这种拉力被定义为表面张力 F_{st} ,单位长度上的表面张力值,称为表面张力系数,用 σ 表示,它的单位为 N/m .

综上所述,液体的自由表面处于拉伸状态.如果是液滴,表层就像蒙在液滴上的弹性薄膜一样,紧紧向中心收缩,力图收缩成最小表面积的球形,从而处于自由表面能最小的稳定平衡状态.如果将液滴切开,取下半球台为分离体,如图 1-8 所示,在球台切面周线上必有张力 F_{st} 连续均匀分布在周线上,与球表面相切.假设周线长度 L ,则表面张力 $F_{st} = \sigma L$.

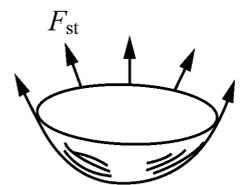


图 1-8 球台周线上的表面张力

所有液体的表面张力系数都随着温度的上升而下降.在液体中添加某些有机溶液或盐类,也可改变它们的表面张力.

例如,把少量的肥皂溶液加入水中,可以显著地降低它的表面张力,而把食盐溶液加入水中,却可提高它的表面张力.常见液体的表面张力系数列于表 1-13 中.

表 1-13 普通液体的表面张力系数(20℃,与空气接触)

液体名称	表面张力系数 $\sigma/(N/m)$	液体名称	表面张力系数 $\sigma/(N/m)$
酒精	0.0223	原油	0.0233~0.0379
苯	0.0289	水	0.0731
四氯化碳	0.0267	水银:在空气中 在水中 在真空中	0.5137
煤油	0.0233~0.0321		0.3926
润滑油	0.0350~0.0379		0.4857

表面张力的影响在大多数工程实际中是被忽略的.但是在水滴和气泡的形成、液体的雾化、以及汽液两相的传热与传质研究中,将是不可忽略的重要因素.

1.8.2 毛细现象

液体分子间的吸引力称为内聚力.液体与固体分子间的吸引力称为附着力.当液体与固体壁面接触时,若液体内聚力小于液体与固体间的附着力,液体将润湿、附着壁面,沿壁面向外伸展.例如,把水倒在玻璃板上就是这种情况.若液体内聚力大于液体与固体间的附着力,液体将不湿润壁面,而是自身抱成一团.例如水银倒在玻璃板上将形成椭球形状,而不湿润玻璃板.水也不湿润石蜡或油腻的壁面,这是因为水的内聚力比与石蜡或油腻壁面的附着力大.

液体与固体壁面接触时的这种性质,可以解释毛细管中液面的上升或下降现象.图 1-9(a)是玻璃管插在水中,(b)是玻璃管插入水银中的情景.因为水的内聚力小于水与玻璃壁面的附着力,水湿润玻璃管壁面并沿壁面伸展,致使水面向上弯曲,表面张力把管内液面向上拉高 h .水银内聚力大于水银与玻璃壁面间的附着力而不湿润管壁面,并沿壁面收缩,致使水银面向下弯曲,表面张力把管内液面向下拉低 h .这种在细管中液面上升或下降的现象称为毛细现象,能发生毛细现象的细管子称为毛细管.

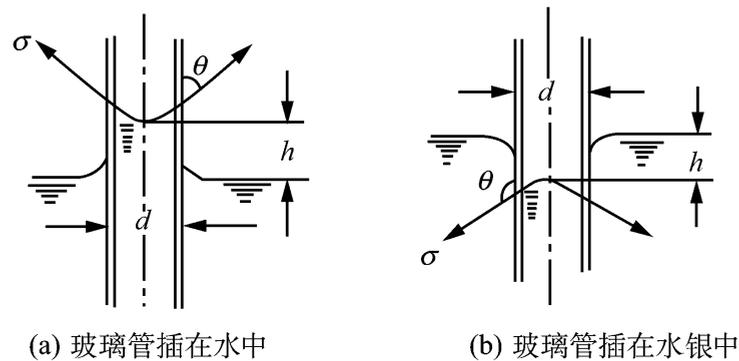


图 1-9

液面为曲面时的表面张力势必造成曲面两侧的压力差.因为液体曲面与固体壁面接触处的表面张力有一指向凹面的合力,要平衡这一合力,凹面的压力必须高于凸面的压力,这种由表面张力引起的附加压力称为毛细压力.若管子很细,则管内的液面可以近似地看作一个球面,设 R 为球面的曲率半径,则曲面的凹面高于凸面的压强差为

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R} \tag{1-19}$$

对肥皂泡,因为存在两个液体表面,故泡内高于泡外的压强差为 $\Delta p = \frac{4\sigma}{R}$.

毛细管中液面上升或下降的高度显然与表面张力有关.现以图 1-9(a)为例,假设液体密度为 ρ ,毛细管直径为 d ,液面与固体壁面的接触角为 θ ,当表面张力与上升液柱重量相等时,液柱便固定在某一高度 h 下达到力的平衡.这时

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

$$h = \frac{4 \sigma \cos \theta}{\rho g d} \quad (1-20)$$

式(1-20)亦可用作计算不浸润液体在细管中的下降高度,只是此时 $\theta > \frac{\pi}{2}$, $\cos \theta$ 为负值,所以 h 也为负值,表示液面是下降的.如图 1-9(b).

液柱上升或下降的高度与管径成反比,与液体种类、管子材料、液面上气体(或不相溶液体)的种类及温度有关.一般来说水的 θ 角在 $0^\circ \sim 9^\circ$ 范围内,水银的 θ 角在 $130^\circ \sim 150^\circ$ 范围内.通常对于水,当玻璃管的内径大于 20mm,对于水银,大于 12mm,毛细现象的影响可以忽略不计.

毛细现象在日常生活和工农业生产中都起着重要的作用.例如,煤油沿着灯芯上升;地下水分会沿着土壤中的毛细孔道上升到地表面蒸发等.在多数工程实际问题中,由于固体的边界足够大,毛细现象的影响可以忽略不计.但当用直径很细的管子作测压计时,则必须考虑毛细现象的影响,否则会引起较大的测量误差.

习 题 一

- 1-1 若气体的比容是 $0.72 \text{ m}^3/\text{kg}$,试求它的密度.
- 1-2 若空气的压强 $p = 3 \text{ MPa}$,温度 $T = 323 \text{ K}$,试求它的密度.
- 1-3 某烟气组分的百分数为 $\alpha_{\text{CO}_2} = 13.5\%$, $\alpha_{\text{SO}_2} = 0.3\%$, $\alpha_{\text{O}_2} = 5.2\%$, $\alpha_{\text{N}_2} = 76\%$, $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 5\%$,试求烟气的密度.若烟气温度 $t = 170^\circ\text{C}$,静表压 $p_j = -1432 \text{ Pa}$,当地大气压 $p_a = 100858 \text{ Pa}$,试求烟气的运动黏度.
- 1-4 当压强增量为 50000 N/m^2 时,某种液体的密度增长 0.02% ,试求该液体的体积模量.
- 1-5 流体中音速的表达式为 $a = \sqrt{dp/d\rho}$,试证明也可写成 $a = \sqrt{K_p/\rho}$.
- 1-6 某流体在圆柱形容器中,当压强为 2 MPa 时,体积为 $0.995 \times 10^{-3} \text{ m}^3$,当压强为 1 MPa 时,体积为 $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$,求它的体积压缩系数.
- 1-7 把绝对压强 $p_1 = 101325 \text{ Pa}$,温度 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ 的水密封在体积 $V = 1 \text{ m}^3$ 的高压容器中进行水压试验.欲使容器中水的绝对压强 $p_2 = 8106000 \text{ Pa}$,试问需高压泵向容器中注入多少体积的水?假设高压容器是不变形刚体,水受压后温度不变.已知 8106000 Pa , 20°C 的水 $K_p =$