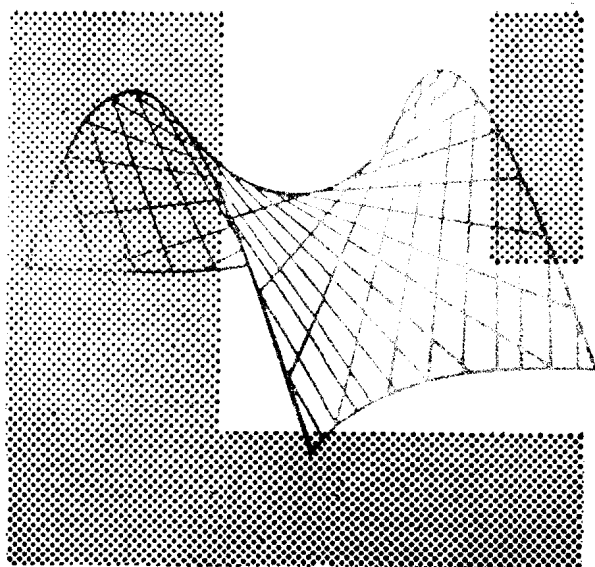


高等专科学校试用教材

流体力学 泵与风机

许玉望 主编

●中国建筑工程出版社



高等专科学校试用教材

流体力学 泵与风机

许玉望 陶进 郑爱平 合编

许玉望 主编

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

本书是高等专科学校供热通风与空调工程专业试用教材,也可供燃气工程等相近专业及有关工程技术人员参考。

全书共十一章。前七章为流体力学部分,主要内容有:流体静力学、一元流体动力学、流体阻力与能量损失、管路计算、孔口、管嘴出流、气体射流,对一元气体动力学及多元流体动力学基础作了简要介绍。后四章为泵与风机部分,主要内容是:离心式泵与风机的构造与理论基础、离心式泵与风机的运行分析、泵与风机的消声与防振等。

本书体系和内容注重体现以实用为目的,以必需、够用为度,以掌握概念、强化应用为原则的特点。各章附有习题,并有部分习题答案。

高等专科学校试用教材

流体力学 泵与风机

许玉望 陶进 郑爱平 合编

许玉望 主编

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京怀柔南华印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 20¹/₂ 字数: 494千字

1995年11月第一版 1995年11月第一次印刷

印数: 1—9,100 册 定价: 15.80 元

ISBN 7-112-02565-6

TU·1968 (7650)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

本书是高等专科学校供热通风与空调工程专业“流体力学泵与风机”课程用教材,是根据1992年全国高等专科学校供热通风与空调工程专业本课程的教学基本要求,并融入多年专科教学实践经验和体会写成的。本书也可作为燃气工程等相近专业本课程用教材。

本书编写过程中,力求反映以下特点:

1. 体现专科教学以实用为目的,以必需、够用为度,以掌握概念、强化应用为原则的特点。全书注意减少了数理论证,着重于讲清基本概念,不追求体系完整和内容俱全,注重以实用选材。如流体力学部分,是以一元流动为全书核心,因为在本专业大多数实际工程中的流动问题均可简化为一元流动问题处理。对一元气体动力学及多元流体动力学作为学生拓宽的理论基础,仅作简要的基本概念介绍,略去了大量的数理论证。

2. 注重理论联系实际,加强实践与应用性知识内容。书中密切结合专业,介绍不少工程实例,增加了例题量且各章均配有大量的习题,引导学以致用,以培养学生分析和解决实际问题的能力。在泵与风机部分,加强了泵与风机运行的工况分析、调节及选用的知识,增加了泵与风机的消声与防振内容。

本书第一、六、七章,第三章一、二节,第五章六、七节及第九章三、四节由武汉冶金科技大学许玉望编写;第二、三、四、五章由长春建筑高等专科学校陶进编写;第八、九、十、十一章由西北建筑工程学院郑爱平编写。全书由许玉望主编。

本书由清华大学李玉柱主审。全书编写过程中得到刘素香、吕萍、赵乱成等老师的大力协助,编者谨向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,加之,多年来作为首次专科教材编写,不妥之处在所难免,恳请批评指正。

AG60/11

目 录

第一章 绪论	1
第一节 流体力学的研究对象、任务及其应用	1
第二节 作用在流体上的力	1
第三节 流体的主要力学性质	3
第四节 流体的力学模型	12
第二章 流体静力学	16
第一节 流体静压强及其特性	16
第二节 流体平衡微分方程	18
第三节 重力作用下静压强的分布规律	19
第四节 压强的表示方法	21
第五节 液柱式测压计	25
第六节 液体的相对平衡	27
第七节 作用于平面上的液体总压力	29
第八节 作用于曲面上的液体总压力	35
第三章 一元流体动力学	44
第一节 描述流体运动的两种方法	44
第二节 描述流场的几个概念	45
第三节 连续性方程	50
第四节 元流能量方程	52
第五节 总流能量方程	55
第六节 能量方程的应用	58
第七节 气流的能量方程	65
第八节 动量方程	69
第四章 流动阻力与能量损失	78
第一节 流动阻力与能量损失的两种形式	78
第二节 两种流态与雷诺数	80
第三节 圆管均匀流及其沿程损失	84
第四节 圆管中的层流运动	85
第五节 圆管中的紊流运动	88
第六节 紊流沿程阻力系数	92
第七节 非圆管流的沿程损失	101
第八节 管流的局部损失	104
第九节 减小阻力的措施	112
第五章 管路计算	118
第一节 概述	118
第二节 简单管路的计算	119

第三节	串联与并联管路的计算	123
第四节	管网计算基础	128
第五节	有压管中的水击	132
第六节	可压缩流体一元恒定流基本方程	135
第七节	音速、滞止参数、马赫数及其流动特性	141
第六章	孔口、管嘴出流和气体射流	151
第一节	孔口自由出流	151
第二节	孔口淹没出流	153
第三节	管嘴出流	157
第四节	无限空间淹没紊流射流特性	162
第五节	圆截面射流的速度与流量变化规律	167
第六节	平面射流	172
第七节	温差或浓差射流及射流弯曲	174
第八节	有限空间射流简介	179
第七章	多元流动流体动力学基础	185
第一节	不可压缩流体连续性微分方程	185
第二节	有旋运动与无旋运动	186
第三节	平面无旋运动	192
第四节	理想流体运动微分方程及其积分	197
第五节	绕流运动与附面层基本概念	201
第六节	曲面附面层分离现象	203
第七节	绕流阻力和升力	205
第八节	悬浮速度	209
第八章	离心式泵与风机的构造与理论基础	213
第一节	泵与风机的分类和应用	213
第二节	离心式泵与风机的基本构造、工作原理和性能参数	216
第三节	欧拉方程	224
第四节	叶轮的叶型及其对泵与风机性能的影响	228
第五节	离心式泵与风机的理论和实际性能曲线	229
第六节	力学相似性原理	236
第七节	相似律与比转数	237
第九章	离心式泵与风机的运行分析	247
第一节	离心式泵的气蚀与安装高度	247
第二节	管路性能曲线与工作点	252
第三节	联合运行及工况分析	256
第四节	泵与风机的工况调节	260
第五节	泵与风机的选用原则	266
第六节	常见故障的分析与排除	275
第十章	其它常用泵与风机	281
第一节	轴流式泵与风机	281
第二节	管道泵	287
第三节	真空泵	288

第四节	射流泵	289
第五节	蒸汽活塞泵	291
第六节	贯流式风机	292
第十一章	泵与风机的消声与防振	295
第一节	噪声的基本概念	295
第二节	噪声的主观评价与噪声功率级的确定	299
第三节	消声原理与消声材料	302
第四节	振动的基础知识	309
第五节	泵与风机的防振措施	311
部分习题参考答案		316

第一章 绪 论

第一节 流体力学的研究对象、任务及其应用

流体力学研究对象是液体和气体，统称为流体。

流体力学的任务是研究流体平衡和运动的力学规律，及其在工程技术中的应用。它是力学学科的一个组成部分。

流体力学可分为理论流体力学和工程流体力学，前者以理论研究为主，后者则是研究实际工程中的流体力学问题。流体力学又可分为水力学和气体动力学。水力学是研究不可压缩流体，主要是液体和一定条件下气体的平衡和运动规律；气体动力学则是研究可压缩流体，主要是气体的平衡和运动规律。本课程属于工程流体力学范畴，主要讲授工程中遇到的不可压缩流体的平衡和运动规律。

流体力学由两个基本部分组成：一是研究流体平衡规律的流体静力学；二是研究流体运动规律的流体动力学。

流体力学和其它科学一样是在人类征服自然的长期斗争中逐渐建立和发展起来的，而它的发展又有力地推动了科学技术和生产的进步。它在生产部门中有着广泛的应用。它是水利、航空、造船、化工、冶金、动力机械、城市建设、环境工程等许多部门以及燃烧学、传热学等学科的重要基础理论之一。

在暖通与空调和燃气工程专业中，流体力学是一门重要基础课程。专业中的主要内容：供热、供冷、通风除尘、空气调节、给水排水及燃气输配等工程中，都是以流体作为工作介质，应用它们的物理特性、平衡与运动规律，将它们有效地组织起来应用于这些技术工程之中的。因此，只有学好流体力学，才能对专业中的流体力学现象作出科学的定性分析及精确的定量计算；才能正确地解决工程中所遇到的流体力学方面的测试、运行、管理与设计计算等问题。

在学习流体力学时，要注重基本原理、基本概念和基本方法的理解和掌握，特别要学会理论联系实际地分析和解决实际工程中的流体力学问题。

本书主要采用国际单位制，基本单位是：米—秒—公斤，代号为 $m-s-kg$ ；由于我国长期使用工程单位，实际工作遇到的某些量仍用工程单位表示，学习应用时，注意两种单位换算。

第二节 作用在流体上的力

作用在流体上的力是流体运动状态变化的重要外因，因此在研究流体运动规律时，必须分析作用在流体上的力。

作用在流体上的力按其作用形式的不同可以分为表面力和质量力两类。

一、表面力

表面力是作用在被研究流体表面上，且与作用的表面面积成正比的力。

表面力可以是流体边界上的外力。如液体自由表面上的外力、流体与固体交界面上的摩擦力、反作用力等；也可以是流体内部一部分流体作用于另一部分流体的交界面上的内力。内力在流体的内部是相互平衡的，即两部分流体交界面相互作用的表面力是大小相等、方向相反、分别作用在两部分流体交界面上的一对内力。而当从流体中取出相交界两部分流体中的一部分，即称为分离体后，则作用在这个分离体体积表面上的内力，就转变成外力。

表面力的表达形式是用单位面积上的切向分力（称为切应力或摩擦应力）和单位面积上的法向分力（称为压应力或正压强）来表示。

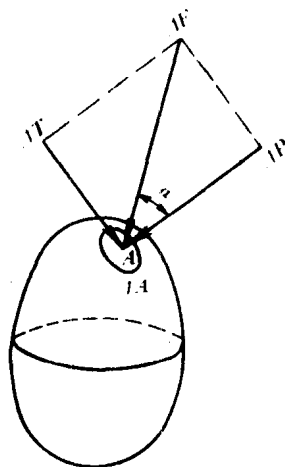


图 1-1 表面力分析

如在流体中取出一分离体，其表面上作用有与其交界的另一部分流体对它作用的表面力。在分离体表面上取包含点 A 的微小面积 ΔA ，作用在 ΔA 面上的表面力为 ΔF ，一般情况下 ΔF 与 ΔA 是斜交的，它们之间成 α 交角。如图 1-1 所示。将 ΔF 分解为沿 ΔA 表面法向和切向的 ΔP 与 ΔT 两个力， ΔP 称 ΔA 面上的总压力， ΔT 为 ΔA 面上的切向力或摩擦力。于是 ΔA 面上的表面力的表达形式为：

$$\left. \begin{aligned} \bar{p} &= \frac{\Delta P}{\Delta A} \\ \bar{\tau} &= \frac{\Delta T}{\Delta A} \end{aligned} \right\} \quad (1-3-1)$$

$\bar{p}$ 为面积 ΔA 上的平均压应力或平均正压强； $\bar{\tau}$ 为面积 ΔA 上的平均切应力或平均摩擦应力。

当微小面积 ΔA 无限缩小而趋近于点 A 时，比值 $\frac{\Delta P}{\Delta A}$ 和 $\frac{\Delta T}{\Delta A}$ 的极限则分别为 A 点处的压强（用 p 表示）和切应力（用 τ 表示），即：

$$\left. \begin{aligned} p &= \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \\ \tau &= \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \end{aligned} \right\} \quad (1-3-2)$$

在国际单位制中，压强 p 和切应力 τ 的单位为帕斯卡，符号为 $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2 = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$ 。

二、质量力

质量力是作用在流体的每一质点上、且与作用的流体的质量成正比的力。如重力、直线惯性力和离心惯性力等。在均质流体中，质量力与受作用流体的体积成比例，所以又叫体积力。

质量力常用单位质量力来表示。若均质流体的质量为 M ，所受的质量力为 F ，则单位质量力为 F/M 。若 F 在直角坐标系 x 、 y 、 z 轴方向上的分量为 F_x 、 F_y 和 F_z ，则在 x 、 y 、 z 轴方向上的单位质量力分量 X 、 Y 、 Z 为：

$$X = \frac{F_x}{M}, \quad Y = \frac{F_y}{M}, \quad Z = \frac{F_z}{M} \quad (1-3-3)$$

如果流体质量力只有与 z 轴反向作用的重力时, 则质量力为 $F = F_z = -G = -Mg$, 单位质量力分量就变成:

$$X = 0, \quad Y = 0, \quad Z = -g \quad (1-3-4)$$

同样可以分析得到, 以等加速度 a 在 x 轴方向作直线匀加速运动的流体, 所受质量力为: $F_x = -Ma, F_y = 0$ 和 $F_z = -Mg$, 单位质量力分力就为:

$$X = -a, \quad Y = 0, \quad Z = -g \quad (1-3-5)$$

以匀角速度 ω 绕垂直固定轴旋转容器中的流体, 所受质量力可表示为: $F_x = M\omega^2 x, F_y = M\omega^2 y$ 和 $F_z = -Mg$ 。单位质量力分力则为:

$$X = \omega^2 x, \quad Y = \omega^2 y, \quad Z = -g \quad (1-3-6)$$

单位质量力的单位为 m/s^2 , 它与加速度的单位相同。

第三节 流体的主要力学性质

流体区别于固体的基本特征是流体具有流动性。这个特性是由于流体不能承受拉力和切力作用的力学性能决定的。拉力作用(哪怕是极小的拉力)使流体产生连续的伸长变形, 只要一直作用, 伸长变形会很快地继续下去, 直到将流体拉断; 切力作用(哪怕是极小的切力)使静止流体产生连续不断的变形, 流体中各质点间产生相对运动, 形成流动。流体的这个性质称为流动性。但是, 流体能承受较大压力, 这点与固体是相同的。流动性使流体的运动具有两个特点: 一是流体形状与流动是由约束它的边界形状所决定的, 因此, 流体流动的边界条件对流体的运动是重要的影响外因; 二是流体的运动与流体的变形联系在一起, 而变形又与其力学性质密切相关, 因此, 流体的力学性质对流体运动是直接影响的内因, 不同力学性质的流体, 即使其边界条件相同也会产生不同的运动。因此研究流体力学问题, 必须了解流体的主要力学性质。

流体的主要力学性质有: 密度、容重、压缩性和热胀性及粘滞性等。

一、密度和容重

和任何物质一样, 流体具有质量和重量。

质量特性常以密度表示。单位体积流体所具有的质量, 称为密度, 用 ρ 表示, 单位为 kg/m^3 。任意点上密度相同的流体, 称为均质流体。均质流体密度可表示为:

$$\rho = M/V \quad (1-4-1)$$

式中 M —— 体积为 V 的流体质量, kg ;

V —— 质量为 M 的流体所占体积, m^3 。

对于非均质流体, 各点处的密度不同, 任一点处的密度用极限式表示为:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (1-4-2)$$

式中 ΔM —— 包含该点微小体积 ΔV 中的流体质量, kg ;

ΔV —— 质量 ΔM 所占体积, m^3 。

流体所受地球的引力为流体的重力特性。流体的重力特性用容重表示。单位体积流体

所引力为流体的容重，用 γ 表示，单位为 N/m^3 。

均质流体的容重：

$$\gamma = G/V \quad (1-4-3)$$

式中 G ——体积为 V 的流体所引力或称重力， $G=Mg$ ， N ；

V ——重力为 G 的流体体积， m^3 。

非均质流体任一点处的容重为：

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (1-4-4)$$

式中 ΔG ——作用在微小体积 ΔV 的流体重力；

ΔV ——包含该点在内的流体体积。

在地球引力场中，密度与容重有以下关系：

$$\gamma = \rho g \quad (1-4-5)$$

这个关系对均质和非均质流体都适用。

需指出，流体的密度 ρ 与海拔位置无关，而其容重 γ 由于与重力加速度 g 有关，因而随海拔位置不同而不同。

常见流体的密度和容重值见表 1-1。

常见流体密度、容重表

表 1-1

流体名称		密度 (kg/m^3)	容重 (N/m^3)	测定条件	
				温度 ($^{\circ}\text{C}$)	气压
气 体	氮	1.2505	12.2674	0	760mmHg
	氧	1.4290	14.0185		
	空气	1.2920	12.6824		
	一氧化碳	1.2500	12.2625		
	二氧化碳	1.9768	19.3924		
液 体	煤油	800~850	7848~8338	15	760mmHg
	纯乙醇	790	7745	15	
	水	1000	9807	4	
	水银	13590	133318	0	

【例题 1-1】 已知煤油的密度 $\rho=800\text{kg/m}^3$ ，求其容重。3L 的此种煤油，质量和重量为多少？

【解】 根据式 (1-4-5)，煤油容重为：

$$\gamma = \rho g = 800 \times 9.81 = 7848 \text{ N/m}^3$$

由 $M=\rho V$ 和 $G=\gamma V$ ，得到：

$$\text{煤油质量：} M=800 \times 0.003\text{m}^3=2.4 \text{ kg}$$

$$\text{煤油重量：} G=7848 \times 0.003\text{m}^3=23.54 \text{ N}$$

二、压缩性和热胀性

在温度不变条件下，流体受压，体积减小，密度增大的性质，称为流体的压缩性。

在一定压力下，流体受热，体积增大，密度减小的性质，称为流体的热胀性。

1. 液体的压缩性和热胀性

液体的压缩性通常以压缩系数 β 表示, 它表示压强每增加 1 帕斯卡时, 液体体积或密度的相对变化率。用数学式表示为:

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1-4-6)$$

或

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta p} \quad (1-4-7)$$

式中 V —— 液体原体积, m^3 ;
 ΔV —— 液体体积变化量, m^3 ;
 Δp —— 作用在流体上的压强增量, Pa ;
 ρ —— 液体原密度, kg/m^3 ;
 $\Delta \rho$ —— 液体密度变化量, kg/m^3 。

式 (1-4-6) 中的负号, 表示压强差与体积变化量呈反变关系。 β 值愈大, 则液体的压缩性也愈大。 β 的单位为 m^2/N 。

压缩系数的倒数为液体的弹性模量, 用 E 表示。即:

$$E = \frac{1}{\beta} = \rho \frac{\Delta p}{\Delta \rho} = -V \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad (1-4-8)$$

E 的单位为 N/m^2 。

表 1-2 列举出了水在 0°C 时, 不同压强下的压缩系数 β 及在相应压强下每增加一个大气压时密度的增大率 $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ ($\Delta p = 101325 \text{Pa}$)。

水在 0°C 时 β 及 $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ ($\Delta p = 101325 \text{Pa}$)

表 1-2

压 强 (at)	5	10	20	40	80
$\beta \text{ (m}^2/\text{N)}$	5.38×10^{-10}	5.36×10^{-10}	5.31×10^{-10}	5.28×10^{-10}	5.15×10^{-10}
$\frac{\Delta \rho}{\rho}$	5.45×10^{-5}	5.43×10^{-5}	5.38×10^{-5}	5.35×10^{-5}	5.22×10^{-5}

液体的热胀性, 一般用热胀系数 α 来表示, 它表示温度每增加 1 (K) 度时, 液体体积或密度的相对变化率, 数学表示式为:

$$\alpha = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (1-4-9)$$

或

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta T} \quad (1-4-10)$$

式中 ΔT —— 温度变化量, K 。

(1-4-10) 式中负号, 表示温度变化量与密度的变化呈反比关系。 α 值愈大, 则液体的热胀性也愈大, 单位为 $1/\text{K}$ 。

表 1-3 列举出了水在一个大气压下, 不同温度 ($^\circ\text{C}$) 时的容重和密度。表中还给出在相隔 10°C 范围内, 温度每升高 1°C 时密度减小率, $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ ($\Delta T = 1$)。

一个大气压下水的 γ 、 ρ 和 $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ ($\Delta T=1^\circ\text{C}$)

表 1-3

温 度 ($^\circ\text{C}$)	容 重 (N/m^3)	密 度 (kg/m^3)	温度升高 1°C 时 $\Delta\rho/\rho$	温 度 ($^\circ\text{C}$)	容 重 (N/m^3)	密 度 (kg/m^3)	温度升高 1°C 时 $\Delta\rho/\rho$
0	9806	999.9		35	9749	994.1	-3.52×10^{-4}
1	9806	999.9		40	9731	992.2	
2	9807	1000		45	9710	990.2	-4.13×10^{-4}
3	9807	1000		50	9690	988.1	
4	9807	1000		55	9657	985.7	-4.97×10^{-4}
5	9807	1000		60	9645	983.2	
6	9807	1000		65	9617	980.6	-5.50×10^{-4}
7	9807	1000		70	9590	977.8	
8	9806	999.9		75	9561	974.9	-6.10×10^{-4}
9	9806	999.9		80	9529	971.8	
10	9805	999.7		85	9500	968.7	-6.71×10^{-4}
15	9799	999.1	-1.5×10^{-4}	90	9467	965.3	
20	9790	998.2		95	9433	961.9	-7.17×10^{-4}
25	9778	997.1	-2.5×10^{-4}	100	9399	958.4	
30	9775	995.7					

【例题 1-2】 0°C 的水在 5 个大气压时体积为 1m^3 ，当压强增加到 10 个大气压时，其体积变化多少？体积的变化率为多少？

【解】 根据 (1-4-6) 式 $\beta = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p}$

有

$$\Delta V = -V\beta\Delta p$$

计算压强差

$$\Delta p = (10-5) \times 101325 = 506625 \text{ Pa}$$

查表 1-2 5 个大气压时, $\beta_5 = 5.38 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$; 10 个大气压时, $\beta_{10} = 5.36 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$

这里计算所用 β 应取其平均值 $\beta = \frac{\beta_{10} + \beta_5}{2} = 5.37 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$

计算 ΔV

$$\Delta V = -5.37 \times 10^{-10} \times 1 \times 506625 = -0.000272 \text{ m}^3$$

负号表示体积减少，体积减少了 0.000272m^3 。体积变化率为：

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{0.000272}{1} = -0.0272\%$$

体积减少了约万分之二点七二。

【例题 1-3】 一个大气压下，100kg 质量的水，温度从 5°C 升高到 85°C ，试问水的体积膨胀了多少？

【解】 根据 $\rho = \frac{M}{V}$ 式，有 $V = \frac{M}{\rho}$ 。

5℃的水 100kg 占有体积为 $V_1 = \frac{M}{\rho_1}$, ρ_1 为 5℃时水的密度; 85℃的水 100kg 占有体积 $V_2 = \frac{M}{\rho_2}$, ρ_2 为 85℃时水的密度。由表 1-3 查得: $\rho_1 = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_2 = 968.7 \text{ kg/m}^3$ 。计算体积膨胀量为:

$$\Delta V = V_2 - V_1 = M \left(\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_1} \right) = 100 \times \left(\frac{1}{968.7} - \frac{1}{1000} \right) = 0.00323 \text{ m}^3 = 3.23 \text{ L}$$

$$\text{计算膨胀率: } \frac{\Delta V}{V} = \frac{0.00323}{0.1} = 0.0323 = 3.23\%$$

2. 气体的压缩性和热胀性

压强和温度的改变对气体密度或容重影响很大。在压强不很高和温度不很低条件下, 气体的压缩性和热胀性可以用理想气体状态方程来描述, 即:

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-4-11)$$

式中 p —— 气体的绝对压强, Pa;

T —— 气体的热力学温度, K;

R —— 气体常数, J/kg · K; 其值可由下式求得, $R = 8314/n$, n 为气体的分子量。对于空气, $R = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 。

同一种气体在不同状态下的压强、温度和密度间的关系, 可表示为:

$$\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2} \quad (1-4-12)$$

式中, 符号下的脚注 1、2 分别表示两种不同状态。

对气体温度不变的等温情况, 则 $T_1 = T_2$, 得到密度与压强关系:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{p_2}{p_1} \quad (1-4-13)$$

表明, 气体的密度与压强成正比。即使气体密度增大一倍, 则需使压强也增大一倍。这里需指出, 气体密度存在一个极限值, 当压强增加到使气体密度增大到这个极限值时, 若再增大压强, 气体密度再也不会增加。这时, 式 (1-4-13) 不再适用了。对应极限密度下的压强为极限压强。

对压强不变的定压情况, 则 $p_1 = p_2$, 得到密度与压强的关系:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-4-14)$$

表明, 气体的密度与温度成反比关系, 即温度增加一倍, 体积增大一倍、密度减小一倍。这里也要指出, 当气体温度降低到其液化温度时, 式 (1-4-14) 规律不再适用了。

将 (1-4-14) 式写成常用形式:

$$\rho_0 T_0 = \rho T = \text{常数} \quad (1-4-15)$$

式中, ρ_0 为温度 T_0 等于 273.16K (近似为 273K) 时的气体密度; ρ 、 T 为任一状态下的密度和热力学温度。

表 1-4 列举了在标准大气压下, 不同温度下空气的容重和密度及温度相隔 10℃ 范围内, 温度每升高一度时密度减小率 $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ ($\Delta T = 1^\circ \text{C}$)。

标准大气压下空气的 γ 、 ρ 和 $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ ($\Delta T=1^\circ\text{C}$)

表 1-4

温度 ($^\circ\text{C}$)	容 重 (N/m^3)	密 度 ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	温度每升高一度时 $\Delta\rho/\rho$	温度 ($^\circ\text{C}$)	容 重 (N/m^3)	密 度 ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	温度每升高一度时 $\Delta\rho/\rho$
0	12.70	1.293		40	11.05	1.128	-3.15×10^{-2}
5	12.47	1.270	-3.54×10^{-2}	50	10.72	1.093	-3.07×10^{-2}
10	12.24	1.248		60	10.40	1.060	-2.97×10^{-2}
15	12.02	1.226	-3.52×10^{-2}	70	10.10	1.029	-2.86×10^{-2}
20	11.80	1.205		80	9.81	1.000	-2.74×10^{-2}
25	11.62	1.185	-3.48×10^{-2}	90	9.55	0.973	-2.71×10^{-2}
30	11.43	1.165		100	9.30	0.947	
35	11.23	1.146	-3.23×10^{-2}				

【例题 1-4】 已知压强为 1 个标准大气压， 5°C 时空气的密度为 1.270kg/m^3 ，求 85°C 时空气的密度和容重。

【解】 由 (1-4-14) 式得到： $\rho_2 = \frac{\rho_1 T_1}{T_2}$ 。 ρ_1 为 5°C 时密度； $T_1 = 273 + 5 = 278\text{K}$ ； $T_2 = 273 + 85 = 358\text{K}$ ；代入上式，得到 85°C 时密度 ρ_2 ：

$$\rho_2 = \frac{1.27 \times 278}{358} = 0.986\text{kg/m}^3$$

85°C 时容重： $\gamma_2 = \rho_2 \cdot g = 9.673\text{N/m}^3$ 计算体积膨胀率：

$$\frac{V_2 - V_1}{V_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 = \frac{1.27}{0.986} - 1 = 0.288 \approx 29\%$$

将此结果与例题 1-3 得到的水的体积膨胀率作粗略比较：

$$\frac{(\Delta V/V_1)_{\text{空气}}}{(\Delta V/V_1)_{\text{水}}} = \frac{0.29}{0.0323} \approx 9$$

可看出气体的膨胀性比液体的大得多。

三、粘滞性

流体在流动时，对相邻两层流体间发生的相对运动，会产生阻碍其相对运动的力，这种力称为内摩擦力。流体所具有的这种抵抗两层间流体相对运动，或通常称为抵抗变形的性质，叫做粘滞性。

为了说明流体粘滞性，例举牛顿应用两板研究流体粘滞性时所做的实验。

设置两块足够大、面积为 A 的相互平行的平板，间距为 h ，板间充满某种液体。将下板固定，以拉力 F 作用于上板，使其以匀速 u 向右运动。图 1-2a 所示。由于液体的粘附作用，附着在下板上的流体质点层的速度为零，而上板面上附着的流体质点层，则以速度 u 随同上板一起运动。在 h 很小时，从下板到上板流体层的运动速度，沿平板法线 y 方向，由零线性的增大到 u （见图 1-2a），两板间的流体流速可表示为 $u=f(y)$ 的函数式。

由于各层流速不同，相邻层就产生相对运动。在距下板 y 处作平行于平板的分离平面，将流体分割为上、下两部分，如图 1-2b 所示。取上部分离体分析，分离体在 F 力作用下向右作匀速直线运动，由受力平衡条件，在分离平面上的交界面上，产生与力 F 大小相等，方向相反的切向力 T （见图 1-2b）。

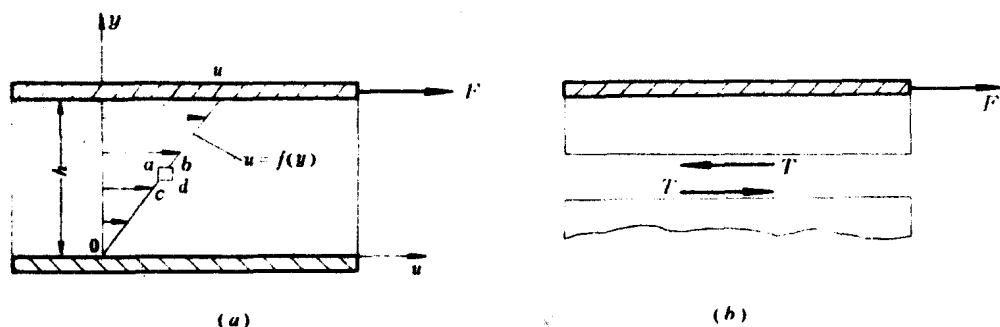


图 1-2 平板间流体速度分布与内摩擦力

根据所讨论过的流体内交界面上表面力性质，切向力 T 则是下部分离体作用于上部分离体的作用力，其作用是阻止上部分流体作相对运动，由此，分析到切向力 T 是抵抗流体相对运动的，且是产生在具有相对运动的相邻层交界面上的内力。同理，在下分离体的交界面将作用由上分离体作用其上的切向力，其大小与 T 相等，但方向相反。上下两部分流体在 y 平面上的这一对相互作用的切向力，即为内摩擦力或粘滞力。可见，流体作相对运动时，必然在内部产生内摩擦力以抵抗流体的相对运动，这就是流体的粘滞性。牛顿经过大量实验证明，对于大多数流体，内摩擦力 T 的大小与两层间沿平板法向的速度梯度 $\frac{du}{dy}$ ，接触面积 A 成正比；与流体的物理性质有关；与接触面上的压力无关。数学表示式为：

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-4-16)$$

这个关系称为牛顿内摩擦定律。

用切应力或摩擦应力表示，则为：

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-4-17)$$

式中各项意义为：

$\frac{du}{dy}$ 项，是流体在垂直其流速方向 y 上的速度梯度，单位是 s^{-1} 。可以分析得到 $\frac{du}{dy}$ 实质上是流体微团的直角变形率。

如图 1-2a 中将相距 dy 两层的流体中，取边长为 dy 的正方形流体微元 $abcd$ ，经过 dt 时间后，该微元运动至 $a'b'c'd'$ 。如图 1-3 所示。因 ab 层与 cd 层存在流速差 du ，除微元平移运动外，还有剪切变形，即由正方形 $abcd$ 变成平行四边形 $a'b'c'd'$ 。 ac 和 bd 间发生了角变形 $d\theta$ 。由于 dt 很小， $d\theta$ 也很小，于是

$$d\theta = \tan(d\theta) = \frac{du \cdot dt}{dy}$$

故

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (1-4-18)$$

得到速度梯度就是直角变形速率。表明粘滞性也是抵抗角变形速率的能力。

τ 项, 是单位面积上的内摩擦力, 称切应力、摩擦应力或粘滞应力, 单位是 N/m^2 , 简称帕。切应力 τ 有大小、方向和作用位置。 τ 的大小由式 (1-4-17) 计算给出; 作用位置在与 u 相同方向的任一流层的交界面上; τ 的方向可以这样确定: 运动较慢的流层作用于运动

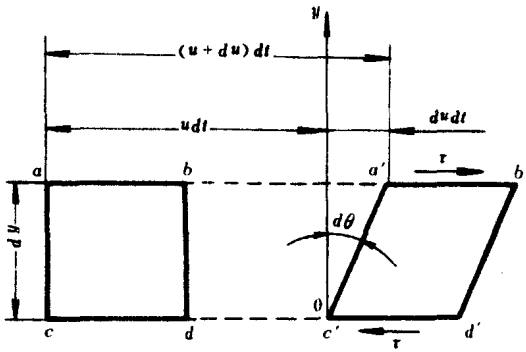


图 1-3 流体微元直角变形速率

较快的流层上的切应力, 其方向与运动速度 u 方向相反; 运动较快的流层作用于运动较慢的流层上的切应力, 其方向与运动速度 u 方向相同。如图 1-3 所示, $c'd'$ 流层上的切应力是由与其交界、运动较慢的流层所作用的, 因而其方向与 u 的方向相反; $a'b'$ 流层上的切应力是由与其交界、运动较快的流层所作用的, 其方向与 u 的方向相同。流体内产生的切应力, 是阻碍流体相对运动的, 但切应力从根本上说不能制止流动的发生。因此, 流体才具有流动性。当流体静止时, 则 $\frac{du}{dy} = 0$, 也就不产生切应力, 但

流体仍有粘滞性。

μ 项, 是与流体物理性能有关的比例系数, 称为动力粘性系数, 单位是 $\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{s}$, 用符号 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 表示。不同的流体有不同的 μ 值, μ 值越大, 表明其粘滞性愈强。由式 (1-4-17) 可看出, 当 $\frac{du}{dy} = 1$ 时, $\tau = \mu$, 表征当速度梯度为 1 时的切应力即为流体的动力粘性系数, 由此表明动力粘性系数 μ 反应出了流体粘性的动力性质。

在流体力学中, 常采用动力粘性系数与其密度的比值, 称为运动粘性系数, 用 ν 表示。即:

$$\nu = \mu / \rho \quad (1-4-19)$$

式中, ρ 为流体的密度; ν 的单位是 m^2/s , 还常用 cm^2/s , 称斯托克斯, 简写 st。

水和空气 (一个大气压下) 的粘性系数

表 1-5

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	水		空 气		温度 ($^{\circ}\text{C}$)	水		空 气	
	$\mu \times 10^{-3}$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	$\nu \times 10^{-6}$ (m^2/s)	$\mu \times 10^{-3}$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	$\nu \times 10^{-6}$ (m^2/s)		$\mu \times 10^{-3}$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	$\nu \times 10^{-6}$ (m^2/s)	$\mu \times 10^{-3}$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	$\nu \times 10^{-6}$ (m^2/s)
0	1.792	1.792	0.0172	13.7	90	0.317	0.328	0.0216	22.9
5	1.519	1.519			100	0.284	0.296	0.0218	23.6
10	1.308	1.308	0.0178	14.7	120			0.0228	26.2
15	1.140	1.140			140			0.0236	28.5
20	1.005	1.007	0.0183	15.7	160			0.0242	30.6
25	0.894	0.897			180			0.0251	33.2
30	0.801	0.804	0.0187	16.6	200			0.0259	35.8
35	0.723	0.727			250			0.0280	42.8
40	0.656	0.661	0.0192	17.6	300			0.0298	49.9
45	0.599	0.605							
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	20.5					
80	0.357	0.367	0.0210	21.7					