

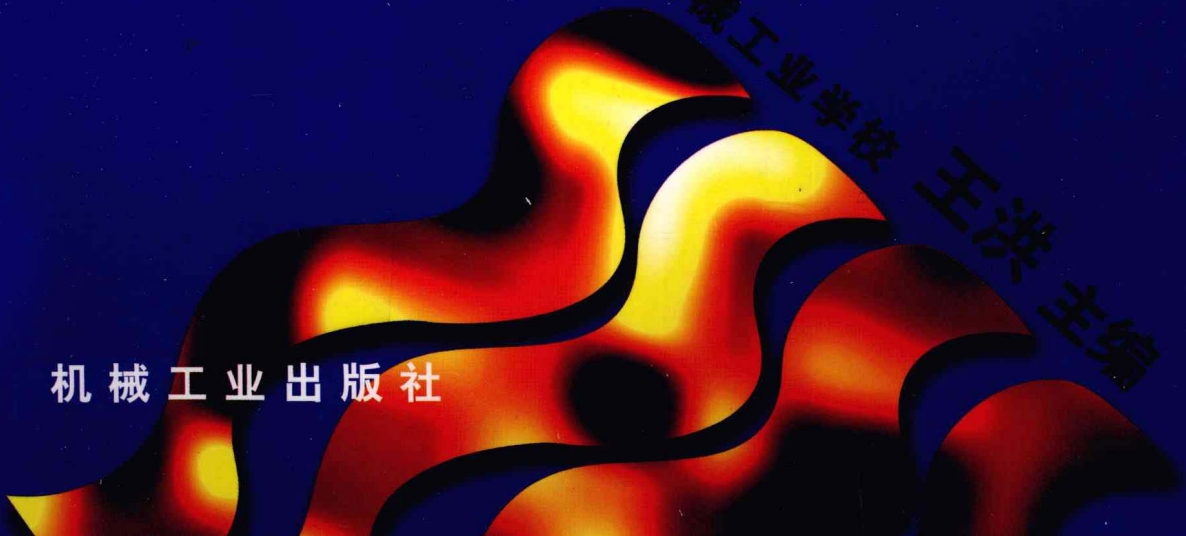


普通中等专业教育机电类规划教材

# 流体力学及 传热学基础

四川省机械工业学校 王洪 主编

机械工业出版社



普通中等专业教育机电类规划教材

# 流体力学及传热学基础

主 编 王 洪  
协 编 荆海鸥 庞 杰 盛维翰  
主 审 尚玉润

机械工业出版社

本书较全面介绍了流体力学及传热学的基本原理,以及这些原理在专业领域中的应用。内容包括:流体的主要力学性质;流体静力学;流体动力学;流动阻力及管路计算;运动物体的阻力及悬浮速度;热传递的基本方式;复合换热以及复合换热器等。本书力求理论联系实际,强调针对性和实用性,重点突出基本概念、基本定律、基本计算方法以及工程应用。

本书为中等专业学校铸造专业教材,也可作为职业学校、成人高校以及工厂技术培训教学用书,对工厂有关工程技术人员解决工程实际问题,亦有重要的指导作用。

### 图书在版编目(CIP)数据

流体力学及传热学基础/王洪主编. —北京:机械工业出版社, 1999.10

普通中等专业教育机电类规划教材

ISBN 7-111-07142-5

I.流… II.王… III.①流体力学-专业学校-教材 ②传热学-专业学校-教材 IV.①035 ②TK124

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第45392号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:董连仁 王霄飞 版式设计:张世琴 责任校对:罗凤书

封面设计:李雨桥 责任印制:何全君

北京第二外国语学院印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1999年10月第1版第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·12.5印张·301千字

0 001—3000册

定价:16.50元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

## 前 言

本书属国家“九五”规划教材，是根据原机械部教育司1996年3月颁发的《流体力学与传热学基础》课程教学大纲编写的。

本书分为两篇共七章。第一篇为流体力学基础（第一～第五章），主要介绍流体及其主要力学性质、流体静力学、流体动力学、流动阻力及管路计算、运动物体的阻力及悬浮速度等；第二篇为传热学基础（第六、七章），主要介绍热传递的基本方式、复合换热以及复合换热器等内容。

本书在编写中，体现了内容上的针对性和实用性，删去了过繁、过多的理论推导，力图用最简便的方法阐述流体力学及传热学的基本原理，以及这些基本原理在专业领域中的应用，突出基本概念、基本定律、基本计算方法和在工程实践中的应用。在每章后均附有思考题和习题，内容上既考虑满足后续专业课教学的需要，又着眼于培养学生运用概念和理论去分析、解决生产实际问题的能力。

本书系中等专业学校铸造专业必修课教学用书，同时可作为中、高等职业教育及成人中专教材，工厂技术培训也可选用，并可供工厂工程技术人员参考。

本书由四川省机械工业学校王洪主编。其中：第一、五章由常州铁路机械学校庞杰编写；绪论、第二、三章由王洪编写；第四章由王洪与内蒙古工业学校盛维翰合写；第六、七章由山东省机械工业学校荆海鸥编写。

本书由大连工业学校尚玉润主审。参加审稿的除参编学校外，还有咸阳机器制造学校、沈阳市机电工业学校、广西机械工业学校、河北省机电工业学校、湖南省机械工业学校等学校的有关老师。

在本书的编写和审稿过程中，许多兄弟学校的老师对教材提出了宝贵的建议，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，编写时间仓促，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

# 目 录

前言	
绪论	1
<b>第一篇 流体力学基础</b>	<b>3</b>
<b>第一章 流体及其主要力学性质</b>	<b>3</b>
第一节 流体的概念	3
一、流体的概述	4
二、流体作为连续介质的概念	4
第二节 流体的性质	5
一、密度	5
二、流体的压缩性和膨胀性	5
第三节 粘性和理想流体的概念	7
一、粘性的概念及产生原因	7
二、牛顿内摩擦定律和粘度	8
三、压强、温度对流体粘性的影响	8
四、理想流体	9
第四节 作用在流体上的力	9
思考题及习题	10
<b>第二章 流体静力学</b>	<b>12</b>
第一节 流体静压强及其特性	12
第二节 流体静力学基本方程式	14
一、静压强基本方程	14
二、静压强分布规律	16
三、等压面的概念	17
第三节 压强表示法	19
一、几种表示压强的方法	19
二、压强的量度单位	20
第四节 流体静力学基本方程的含义	21
一、物理意义(能量意义)	21
二、几何意义	22
第五节 流体压强的测量	23
一、单管测压计(测压管)	23
二、U型管测压计	23
三、U型管压差计	24
四、倾斜管测压计(微压计)	25
第六节 巴斯加原理及应用	26
第七节 作用在平面壁上的液体总压力	28
一、总压力的大小和方向	29
二、总压力的作用点	29
第八节 作用于曲面上的液体总压力	33
一、曲面总压力	33
二、总压力的方向和作用点	34
三、压力体的概念	34
第九节 物体的沉浮与铸型抬箱力计算	37
一、物体的沉浮	37
二、铸型抬箱力的计算	40
第十节 液体的相对平衡	42
一、均匀直线运动容器中液体的相对平衡	42
二、等加速直线运动容器中液体的相对平衡	42
三、等角速度旋转容器中液体的相对平衡	43
思考题及习题	46
<b>第三章 流体动力学</b>	<b>53</b>
第一节 研究流体运动的两种方法	53
一、拉格朗日法	53
二、欧拉法	53
第二节 流体动力学的有关基本概念	54
一、流体运动的分类	54
二、迹线和流线	55
三、缓变流与急变流	56
四、流管、流束及总流	57
五、有效断面、流量和平均流速	57
六、湿周与水力半径	58
第三节 流体运动的连续性方程	59
一、流束的连续性方程	59
二、总流的连续性方程	59
第四节 非压缩性流体的伯努利方程	61
一、理想流体流束的伯努利方程	61
二、理想流体流束伯努利方程的意义	63
三、实际流体流束的伯努利方程	66
四、实际流体总流的伯努利方程	66
五、水力坡度和测压管水头线的绘制	67
第五节 伯努利方程的应用	69
一、应用条件	69

二、沿程有支流（或汇流）的伯努利方程.....	70	二、通风机和烟囱的选择 .....	124
三、有机械功输入（或输出）的伯努利方程.....	70	三、气体在炉内流动时的压头损失 .....	124
四、伯努利方程应用实例.....	71	四、烟囱的设计计算 .....	125
第六节 稳定流的动量方程.....	77	第九节 实验 .....	128
一、动量定理.....	77	一、雷诺实验 .....	128
二、稳定流的动量方程.....	78	二、水头损失实验 .....	129
三、动量方程的应用.....	79	思考题及习题 .....	131
第七节 实验.....	80	第五章 运动物体的阻力及悬浮速度.....	134
一、伯努利方程实验.....	80	第一节 运动物体的阻力及阻力系数 .....	134
二、流速和流量的测定实验.....	82	一、运动物体的阻力 .....	134
思考题及习题.....	84	二、阻力系数 $C$ 的确定 .....	135
第四章 流动阻力与管路计算 .....	91	第二节 球形物体的自由悬浮速度 .....	137
第一节 能量损失的两种形式.....	91	一、沉降速度和悬浮速度 .....	137
一、沿程阻力和沿程损失.....	91	二、悬浮速度的一般表达式 .....	138
二、局部阻力与局部损失.....	91	第三节 非球体及颗粒群悬浮速度概述 .....	140
第二节 流体运动的两种状态和雷诺实验.....	92	一、非球体颗粒的悬浮速度 .....	140
一、雷诺实验.....	92	二、颗粒群的悬浮速度 .....	141
二、雷诺数及临界流速.....	92	第四节 固体颗粒在水平管道中的悬浮及运动状态 .....	142
第三节 圆管中层流与紊流的流速分布.....	94	一、水平管道中的颗粒悬浮 .....	142
一、层流的流速分布.....	94	二、水平管道内颗粒的运动状态 .....	142
二、紊流的基本特性和流速分布.....	95	思考题及习题 .....	143
第四节 流体的沿程水头损失计算.....	97	第二篇 传热学基础.....	145
一、沿程水头损失的计算公式.....	97	第六章 热传递的基本知识 .....	145
二、沿程阻力系数的确定 .....	100	第一节 热的传递及其基本方式 .....	145
三、非圆形管道沿程阻力损失计算 .....	103	一、热传导 .....	145
第五节 流体局部损失计算 .....	104	二、热对流 .....	145
一、局部水头损失的一般计算公式 .....	104	三、热辐射 .....	146
二、各种局部阻力损失系数的确定 .....	106	第二节 导热 .....	146
三、水头损失的叠加 .....	109	一、导热的基本概念与定律 .....	146
第六节 管路的水力计算 .....	109	二、平壁的稳定导热 .....	149
一、管路的分类 .....	110	三、圆筒壁的稳定导热 .....	152
二、短管的水力计算 .....	110	第三节 对流换热 .....	155
三、长管的水力计算 .....	113	一、对流换热的概念及牛顿公式 .....	155
四、枝状管网的水力计算 .....	115	二、影响对流换热的因素 .....	156
第七节 孔口和管嘴的水力计算 .....	116	三、相似理论及其在对流换热中的应用 .....	157
一、定水头下圆形薄壁小孔口的出流 .....	116	四、流体在管内受迫对流时的换热计算 .....	159
二、定水头下圆柱形管嘴的出流 .....	119	五、流体在自然对流时的换热 .....	159
三、内浇道流速及平均计算静压头 .....	121	第四节 辐射换热 .....	163
第八节 炉内气体流动与通风机及烟囱的选择 .....	122	一、辐射换热的基本概念 .....	163
一、炉内气体的流动 .....	123	二、热辐射的基本定律 .....	165
		三、物体间辐射换热的计算 .....	167

四、气体辐射和火焰辐射 .....	171	一、冲天炉内热交换分析 .....	184
思考题及习题 .....	173	二、密筋炉胆的热交换分析 .....	185
第七章 复合换热及其应用 .....	175	思考题及习题 .....	187
第一节 复合换热 .....	175	附录 A 在饱和线上水的物理参数 .....	189
第二节 传热过程的特点及计算 .....	176	附录 B 在大气压下干空气的物理 参数 .....	190
一、通过平壁的传热 .....	176	附录 C 各种不同材料的密度、热导率、 比热容和热扩散率 .....	191
二、通过圆筒壁的传热 .....	178	附录 D 各种不同材料在表面法线方向上 的辐射黑度 .....	192
三、通过肋壁的传热 .....	180	主要参考文献 .....	193
第三节 传热的增强和削弱 .....	182		
一、增加传热面积 .....	182		
二、提高传热温差 .....	182		
三、增大传热系数 .....	182		
第四节 复合换热应用举例 .....	184		

# 绪 论

流体力学与传热学是两门独立的学科，但其间有着一定的联系，并且共同作为铸造专业的重要基础理论，按课程综合化要求，合并成一门课程开设。

## 一、流体力学与传热学的研究对象

在一定条件下，自然界中各种物质分别以固体、液体和气体状态存在，液体和气体统称为流体。关于固体的基本力学问题，已在理论力学和材料力学课程进行了论述；而有关流体的基本力学问题，则是流体力学所要研究的。

流体力学是采用理论分析与实验相结合的方法，研究流体的平衡和运动规律以及这些规律在实际中应用的一门科学。

流体包括液体和气体，因此流体力学也就包括液体力学和气体力学。在研究中，液体通常是以水为代表，故液体力学一般也称为水力学。从分析研究液体着手，所建立的有关液体的一些基本规律，对于平衡的或运动速度远低于声速的气体也是适用的。由于在铸造生产中遇到的流体绝大多数为液体或运动速度远低于声速的气体，因此本书的内容将侧重于水力学的基本知识。

传热学是研究热量传递的一门科学。在自然界中，普遍存在着温度差，只要有温差存在，热量总会自发地从高温传向低温，因此热的传递是一个很普遍的自然现象。传热学就是研究热传递和热平衡的基本规律，并运用这些规律去分析解决工程技术中的实际问题。

## 二、流体力学与传热学在铸造生产中的应用

在铸造生产中，流体力学的基本理论知识和计算方法得到了广泛地运用。如：液态金属在浇注和充填铸型过程中流动情况的分析；浇注系统的水力学计算方法；铸型抬箱力的计算；冲天炉中炉气的流动、风量及风压的测定；供风管道、局部装置、炉胆和料层阻力的计算；烟囱原理；通风除尘系统计算；气动装置和液压传动等，都是建立在流体静力学、流体动力学和能力损失等基本理论的基础上。

传热学的基本规律在铸造生产中的应用也是非常普遍的。如：熔炼合金的冲天炉、烘干砂型或芯的烘干炉、铸件退火的退火炉等，都要涉及到对热传递的分析和计算。正确地应用传热学的理论去分析、解决这些问题，不但可以有效地利用能源，而且也有利于提高铸件质量。又如，借助于传热学理论的指导，可对铸件的凝固顺序和凝固时间进行分析计算，并采取相应措施加以控制，既可保证铸件质量，又能节省金属和时间。

## 三、本课程的任务和教学方法

本课程是铸造专业学生必修的一门技术基础课。其任务是了解流体的性质，掌握流体平衡和运动规律，学习流动阻力和能量损失、运动物体阻力和悬浮速度、热传递的基本理论，掌握相应的计算方法，为学习专业课（铸造工艺学、铸造合金熔炼、铸造设备）和解决本专业生产中的有关技术问题奠定一定的基础。

本课程理论性很强，应以课堂教学为主，重点要放在基本概念、基本理论和基本计算方法上，力求达到概念正确、掌握牢固，不要把时间过多用在繁杂的数学推导上。有些内容可



采用分析与讨论相结合的方式教学，以促进对学生思维、分析和解决问题能力的培养。

要重视实验和直观教学，这样既有利于学生理解和验证一些比较抽象的概念，也有助于培养学生的实践能力。

本书每章后都附有思考题和习题。思考题是为明确和加深所学的概念，习题是为了掌握计算方法，培养分析能力。由于题目数量较多，教师可从中选择，适量布置。

# 第一篇 流体力学基础

流体力学是以理论分析与实验相结合的方法，研究流体平衡和运动的规律，以及这些规律在工程实际中应用的一门科学。

流体力学包括流体静力学和流体动力学两部分。其中，流体静力学将研究静止流体中压强分布规律及对固体接触面的作用力等问题；流体动力学将研究运动流体中各种运动参数变化的规律、流体与固体接触面的相互作用力等问题。

本篇共分五章。第一章介绍流体的概念和流体的主要力学性质，这是决定流体平衡和运动规律的内部原因，也是讨论流体的力学规律的基础。第二章是流体静力学，将论述流体处于平衡时的力学规律，这既有在工程上的实际意义，同时也是进一步研究流体运动的必要基础。第三章是流体动力学，也包括了流体运动学方面内容，将从理想流体出发，推导和分析流体运动的基本规律和特点，并重点讨论连续性方程、伯努利方程、动量方程及其应用。第四章是流动阻力及管路计算，将论述实际流体在管路内流动时因粘性导致流动阻力产生的规律，以及计算和确定流体能量损失的基本方法，解决实际管路的水力计算问题。第五章是运动物体的阻力及悬浮速度，将分析运动物体阻力产生的原因，着重讨论物体特别是颗粒群的悬浮速度及计算方法，为专业课中研究气力输送问题奠定一定的理论基础。这五章在内容上，既有密切联系，又分别有独立的一面，是按照由浅入深，由简及繁，由基础理论到实际应用的顺序进行的。

## 第一章 流体及其主要力学性质

在论述流体的力学规律之前，必须首先对流体建立明确的概念，并对决定流体平衡和运动规律的内部原因——流体的力学性质进行分析和探讨。本章将在明确流体概念及特征的基础上，讨论流体的基本力学性质，以及这些性质对流体平衡和运动规律的影响。

### 第一节 流体的概念

#### 一、流体的概述

自然界中常见的物质有三种状态，即固体、流体和气体。从它们的外部特征上看：固体有一定的形状，而气体和流体却不能像固体那样保持一定的形状，任何微小的外力都可以促使气体和液体产生很大的变形，甚至在重力作用下也会使其发生变形。但如何根据它们的内部实质加以分析区别，还是需要予以说明的。

固体，其分子排列紧密，分子间的引力和斥力都较大，分子被束缚在平衡位置附近，只能作微小的振动而不能相对移动。因此分子间的距离和相对位置都较难改变，可以抵抗压

力、拉力和切力三种力；在所受作用力不大时，可以保持自身体积和形状固定不变。

流体和气体与固体相比，分子排列松散，分子间引力较小，分子运动强烈，除在平衡位置附近作振动外，还可离开平衡位置作无规则的相对移动，使分子间距离和相对位置发生较大改变，不能抵抗拉力和切力，因而不易保持一定的形状，表现出较大的流动性，所以液体和气体统称为流体。这就是流体同固体在力学性质上存在显著区别的根本原因。

液体和气体具有的共同特性是流动性，但它们还存在以下不同特性：

液体分子间的距离比固体分子（或离子）间的距离大，却比气体分子之间的距离小，分子之间的引力尚能使液体保持一定的体积。故在重力作用下有边界（自由）液面，有比较固定的体积，而在受到压缩时因分子之间的斥力较大，故有一定抗力，因而在实用意义上具有不可压缩的特性。

然而，气体由于其分子之间的距离很大，引力很弱，因此，既不能保持一定的形状，也不能保持一定的体积，总是完全地充满所占容器的空间，没有自由面，表现出较大的膨胀性。同时由于气体分子之间的斥力很弱，因而很容易被压缩，被认为是可压缩流体。

因此，只要所研究的问题不涉及压缩性时，所建立的流体力学规律，对气体和液体均是适用的；否则，气体和液体应分别处理。

## 二、流体作为连续介质的概念

流体是由分子所组成，而分子之间是存在空隙的。流体的分子总是不断地作杂乱无规则的热运动。如果要考虑到这种微观上的物质不连续性（空隙），并从每一个分子的运动出发去掌握整个流体平衡与运动的规律，是很困难甚至是不可能的。1753年，欧拉（Euler）建议采用连续介质这一概念来对流体的运动进行研究。即把真正的流体看成是一种假想的、由无限多流体质点所组成的稠密而无间隙的连续介质，而且这种连续介质仍然具有流体的一切基本力学性质。

将流体看成是一种连续介质是可行的。因为流体力学所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的机械运动。宏观流体总是具有一定体积的。即使是微小的流体质点，虽然其体积相对于流动空间来说是很小而可忽略不计，但它相对于分子距和分子的平均自由行程的尺寸来说，却是足够大的，其内仍含有大量的分子。例如，在标准状况下，每立方毫米的空气中包含 $2.7 \times 10^{16}$ 个分子，空气分子的平均自由行程约为 $7 \times 10^{-6}$ cm，可见分子距和分子的平均自由行程都是极其微小的，它与机械运动的距离相比是微不足道的。所以在对流体进行宏观研究时，完全可以把流体看成是既没有空隙也没有分子运动的连续介质。

必须注意，所谓流体的连续性，不仅是指物质的连续不间断性，也是指一些物理参数的连续不突变性。即反映宏观流体的密度、流速、压力等物理量也必定是空间坐标的连续函数。这样，在流体力学的研究中，就可以应用连续函数来描述和解决各类问题。

应当指出，上述对流体连续性的基本假设是有一定范围的，若超过这个范围，假设将不再成立。例如，在高真空的真空泵中，温度为293K的空气，当压力为 $133.336 \times 10^{-3}$ Pa（即 $10^{-3}$ mmHg）时，其分子距约为4.5mm，这个数值与真空泵的尺寸就可比拟了，此时就不能再将气体看成是连续介质了。

本书所研究的流体均是指这种连续介质。是由无穷多个连续分布的微小流体团所组成。这种微小的流体团被称之为流体质点，有时也叫流体微团。

## 第二节 流体的性质

在流体力学中要考虑的流体性质有密度、粘性、压缩性、膨胀性、表面张力和蒸气压等。根据本专业的具体需要，将主要讨论前四个性质，后两个性质则从略。

### 一、密度

流体和固体一样具有质量。单位体积内所具有的质量称为质量密度或简称为密度，用符号  $\rho$  表示。对于均质流体，密度等于流体的质量与它所占有的体积的比值，即

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

式中  $\rho$ ——流体的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；

$m$ ——流体的质量 ( $\text{kg}$ )；

$V$ ——流体的体积 ( $\text{m}^3$ )。

在热力学和气体动力学中，气体体积的量度，是用单位质量流体所具有的体积——即比体积来表示的。对于均质流体，比体积  $v$  等于流体体积与其质量的比值，即

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

可见，比体积与密度互为倒数， $v$  的单位为  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。

液体的密度在一般情况下，可视为不随温度或压强而变化；但气体的密度则随温度和压强可发生很大的变化。

几种常见流体的密度见表 1-1。

表 1-1 几种流体的密度(101.325kPa 下)

流体名称	温度 $t/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	流体名称	温度 $t/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
水	4	1000	钢	1550	7200
海水	15	1020	熔化生铁	1200 ~ 1280	6800 ~ 7000
水银	0	13600	铝合金	720 ~ 810	2600
酒精	20	789	铜合金	1000	8200
汽油	15	724	空气	0	1.29
柴油	15	876	氧	0	1.429
重油	15	890 ~ 940	氢	0	0.0899
润滑油	15	900 ~ 930	一氧化碳	0	1.250
液压油	15	860 ~ 900	二氧化碳	0	1.976

### 二、流体的压缩性和膨胀性

流体同固体不同，其体积大小将随所承受的压力和温度的变化而变化。当温度不变，随作用在流体上的压力增大所产生的流体体积减小，被称为流体的压缩性；当压力不变，流体因温度升高而产生的体积增大，被称为流体的膨胀性。液体和气体在这两种性质上的差别是很大的。

#### 1. 液体的压缩性和膨胀性

液体压缩性的大小，一般用等温压缩率  $\kappa_T$  表示。其意义是指温度不变时，由压强变化所引起的液体体积的相对变化量，即

$$\kappa_T = -\frac{\Delta V/V}{\Delta p} = -\frac{\Delta V}{V\Delta p} \quad (1-3)$$

式中  $\kappa_T$ ——体积压缩系数 ( $\text{Pa}^{-1}$ )；

$\Delta V$ ——压缩前后液体体积改变量 ( $\text{m}^3$ )；

$V$ ——液体原来所有的体积 ( $\text{m}^3$ )；

$\Delta p$ ——压强的变化量 ( $\text{Pa}$ )。

由式 (1-3) 可见， $\Delta V$  与  $\Delta p$  变化相反，即压强增加时体积减小，故式前加入一负号，使  $\kappa_T$  为正值。据实测，液体的  $\kappa_T$  非常小。表 1-2 中列举了水的  $\kappa_T$  值。

表 1-2 0℃水在不同压强下的  $\kappa_T$  值

压强 $p/(9.81 \times 10^4 \text{ Pa})$	5	10	20	40	60
$\kappa_T/(10^{-4} \text{ Pa})$	0.529	0.527	0.521	0.513	0.505

从表 1-2 中可知，在温度为 0℃，压强为  $4.905 \times 10^5 \text{ Pa}$  (5at) 情况下，每增加  $9.81 \times 10^4 \text{ Pa}$  (1at) 时，水的体积 (即  $\kappa_T$ ) 只改变万分之 0.529；随着压强的增加，还在减小。其它液体的情况与水类似，压缩性是很小的。因此，在工程上可把液体看成是不可压缩的，只有在特殊情况下，如管中水击作用和高压造型机的液压传动系统中，才必须考虑液体的压缩性。

液体膨胀性的大小用体膨胀系数  $\alpha_V$  表示。其意义是指压强不变时，温度每改变 1℃ 时引起的液体体积的相对变化量，即

$$\alpha_V = \frac{\Delta V/V}{\Delta t} = \frac{\Delta V}{V\Delta t} \quad (1-4)$$

式中  $\alpha_V$ ——液体体膨胀系数 ( $1/^\circ\text{C}$ )；

$V$ ——膨胀前液体所占有的体积 ( $\text{m}^3$ )；

$\Delta V$ ——膨胀前后液体体积的变化量 ( $\text{m}^3$ )；

$\Delta t$ ——温度的改变量 ( $^\circ\text{C}$ )。

实验指出，在  $9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$  (即 1at) 下，温度较低 ( $10 \sim 20^\circ\text{C}$ ) 时，温度每增高 1℃，水的体积相对改变量仅为万分之 1.5 (即  $\alpha_V = 150 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ )；温度较高 ( $90 \sim 100^\circ\text{C}$ ) 时，也只改变万分之 7 (即  $\alpha_V = 700 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ )。因此，在工程实用中，除供热系统外，可以不考虑液体的膨胀性。

## 2. 气体的压缩性和膨胀性

温度与压强的改变，对气体体积变化的影响很大。根据物理学中理想气体状态方程可知，对一定质量的理想气体，当温度不变时，气体体积与压强成反比，即压强增加一倍，体积减为原来的一半；当压强不变时，体积与热力学温度成正比，温度每升高 1K，体积就膨胀 1/273。由此可见，气体具有很大的压缩性和膨胀性。但当气体流速不高 (小于 50m/s)，或在运动过程中温度、压力变化不大 (相对压强小于  $9.81 \times 10^4 \text{ Pa}$ ) 时，也可将气体看作和水一样是不可压缩流体。这样，关于液体平衡和运动规律也同样适合于气体的流动。比如在

铸造车间的通风除尘系统和气力输送系统的设计计算中，因管道内的气流速度一般都小于20m/s，故可以不考虑气体的压缩性和膨胀性，按液体的运动和平衡规律进行处理。

综上所述可知，液体在一般情况下的压缩性、膨胀性很小，可略去不计，其密度可以看作是常数，这种流体称之为不可压缩流体。反之，若流体的压缩性和膨胀性较大，其密度就不能看成是常数，这样的流体称为可压缩流体。

### 第三节 粘性和理想流体的概念

在流体的各种性质中，对研究流体流动具有重要作用的就是粘性。

#### 一、粘性的概念及产生原因

从日常生活中可以发现，静止时油和水同属液体，在状态上没有什么区别。但如果从瓶中将水或油倒出时，不难发现水比油流得更快一些；而到了冬天，油的流动显得更慢些。用热水清洗油碗也显得比冷水更易洗干净。这些现象从感性上说明，流体在运动中反映出一种性质，它对流体的运动起着阻挠作用。并且流体的这一性质不仅与流体种类有关，还与温度有关。那么这是一种什么性质呢？

为了说明这个问题，首先观察图 1-1 所示的实验。

在两平行的平板间充满了某种流体，且两板距离较近为  $B$ 。上面的一块板以固定速度  $v$  向右移动，下面一块板固定不动。当上板运动时，两板间的流体便出现不同速度的运动状态，呈现出图示的速度分布规律。即从附着在动板下面的流体层具有与动板相等的速度  $v$  开始，越往下速度越小，直到附着在定板上的流体层的速度为零的线性分布。

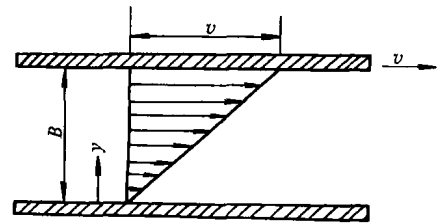


图 1-1 速度分布图

实验表明，当流体处于运动状态时，在相邻流体层之间存在着相对运动。这样，上层运动较快的流体层将对下层流体施加一作用力，并带动下层流体运动；而下层流体也必然给上层流体的运动产生一个反作用力，阻碍其运动。因此，在相邻流体层间除存在速度差异外，必然还存在一对大小相等、方向相反的作用力，既促使下层流体的运动，也阻挠上层流体的运动，类似于固体运动时在运动面间产生的一对摩擦力。由于这一对力是在流体内部产生的，所以叫作内摩擦力或粘性阻力。

因此，当流体层间发生相对运动时，在流体内部就会产生内摩擦力阻碍相对运动。流体具有的这一性质，称为流体的粘性，或粘滞性。它实质上反映了流体抵抗剪切作用，阻止变形产生的能力。虽然流体的这一能力很弱，但它是存在的。流体性质不同，所具有的粘性也不同，因而油与水具有不同的流动速度。

那么，流体为什么会产生粘性呢？从流体微观结构上解释，主要有两个方面的原因。

- 1) 分子不规则运动的动量交换形成阻力。
- 2) 流体层间的相对运动使原分子排列变化，导致分子间引力平衡破坏而形成阻力。

显然，气体因分子距很大，分子间引力很弱，而分子的不规则运动极为强烈，所以气体粘性的产生，主要是分子不规则运动的动量交换形成的阻力作用结果；对于液体，其分子不规则运动微弱，所以分子间引力形成的阻力是液体粘性产生的主要原因。

## 二、牛顿内摩擦定律和粘度

牛顿 (Newton) 经过长期的实验研究, 于 1686 年总结出关于确定流体内摩擦力的牛顿内摩擦定律。即

$$F = \pm \mu S \frac{dv}{dy} \quad (1-5)$$

单位面积上的摩擦力 (切应力) 为

$$\tau = \pm \mu \frac{dv}{dy} \quad (1-6)$$

式中  $F$ ——流层之间的内摩擦力 (N);

$\tau$ ——摩擦切应力 (N/m<sup>2</sup>);

$S$ ——流层之间的接触面积 (m<sup>2</sup>);

$dv/dy$ ——流体沿法线方向的速度梯度 (s<sup>-1</sup>);

$\mu$ ——动力粘度 (Pa·s), 其值与流体性质、温度有关。

式中正、负号是为使  $F$ 、 $\tau$  永为正值。当  $dv/dy > 0$  时取正号; 当  $dv/dy < 0$  时取负号。

在考虑流体的内摩擦力时, 必须注意以下几个问题:

1) 切应力  $\tau$  是成对出现的, 快层作用于慢层上的是拖力, 其方向与运动方向一致; 慢层作用到快层上的是阻力, 其方向与运动方向相反。

2) 当  $dv/dy = 0$  时,  $F = \tau = 0$ 。即当流体处于静止或相对静止时, 流体没有内摩擦力或切应力, 也就是说流体不存在静摩擦力。因此, 只要在静止流体上稍加一点剪切力, 它就会开始流动, 表现出极大的易流动性。在这方面, 流体与固体是大不相同的。但要注意, 流体没有静摩擦力, 并不是说静止流体没有粘性。粘性作为流体的物理属性, 总是存在的, 仅仅只是当流体处于静止时粘性没有表现出来而已。

3) 在流体力学中, 经常用动力粘度  $\mu$  与密度的比值来表示粘性的大小, 这个比值通常用  $\nu$  表示, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-7)$$

对于不可压缩的流体, 其密度  $\rho$  是一常数, 因此  $\nu$  的数值与  $\mu$  成正比。 $\nu$  的单位是 m<sup>2</sup>/s, 称之为运动粘度。

## 三、压强、温度对流体粘性的影响

流体粘性的大小, 首先取决于流体本身的性质, 如液体的粘性大于气体, 而糖浆、甘油的粘性大于水。其次, 同一种流体因其所处状态 (压强、温度) 不同, 粘性也会有所不同。由于压强变化对分子内聚力和热运动影响不大, 因此在一般压强 ( $p \leq 1.96 \times 10^7$  Pa) 下, 可不考虑压强对粘性的影响。

从粘性产生的原因中不难看出, 温度对流体粘性的影响很大, 并且这种影响对气体和液体是截然不同的。当温度升高时, 因分子的不规则运动增强, 故气体的粘性也随之增大; 而流体则会因分子随温度升高而能量增大, 分子距加大, 吸引力减小, 使其粘性下降。因此, 在铸造生产中, 为提高金属液的充型能力, 采取的一个主要措施就是适当提高浇注温度, 以减小铁液粘性, 增加其流动性。

流体的粘性可采用实验的方法测出。表 1-3 列举了几种流体在一个标准大气压 (1 atm = 101.325 kPa) 下, 不同温度时的动力粘度和运动粘度, 供实际计算时参考。

表 1-3 几种流体的  $\mu$ 、 $\nu$  值 (在 101.325kPa 下)

流 体 种 类	温度 $t/^\circ\text{C}$	动力粘度 $10^6 \cdot \mu / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	运动粘度 $10^6 \cdot \nu / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	流 体 种 类	温度 $t/^\circ\text{C}$	动力粘度 $10^6 \cdot \mu / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	运动粘度 $10^6 \cdot \nu / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
水	0	1792	1.792	空气	80	20.88	20.90
	5	1519	1.519		100	21.75	23.00
	10	1308	1.308		140	23.44	27.40
	20	1005	1.007		180	25.05	32.20
	30	801	0.804		220	26.58	37.10
	40	656	0.661		260	28.06	42.40
	60	469	0.477		300	29.46	48.10
	80	357	0.367		400	32.77	62.50
	100	284	0.296		500	35.83	78.50
	空气	0	17.25		13.33	灰铸铁	1300
10		17.70	14.21	( $w_c = 3.0\%$ )	1400	3500	0.51
20		18.20	15.12	灰铸铁	1300	3760	0.54
30		18.65	16.04	( $w_c = 3.3\%$ )	1400	3450	0.51
40		19.12	16.98	铸钢	1500	2800	0.40
60		19.97	18.80		1700	1900	0.27

#### 四、理想流体

由上述可知,自然界中的所有流体都是有粘性的,在运动时都将产生内摩擦力,这样的流体称之为实际流体,或称粘性流体。在对流体运动规律进行研究时,如果考虑流体的粘性,则会使研究过程变得极为复杂,甚至无法进行。为使问题得以简化,可以引入理想流体的概念。即将忽略了粘性或假定没有粘性的流体,称为理想流体。

显然,理想流体概念的引入,一方面使在研究中不再考虑粘性对流体运动的影响,可以比较容易的得到一些理论结果,然后再考虑实际流体的粘性作用,通过实验对已取得的理论结果进行修正,从而得出与实际流体情况相符的运动规律;另一方面,在许多问题(如流体自身粘性很小或相对运动速度很小)中,粘性的影响也不十分明显,通过理想流体的研究,完全可以得出实际有用的结果。因此,理想流体的引入对于认识和研究流体的运动规律有着重要的意义。

### 第四节 作用在流体上的力

流体力学既然是研究流体平衡和运动规律的科学,那么就必须了解流体受到哪些力的作用。因为平衡指的是所受诸力的平衡,而运动是在力的作用下产生的。

作用于流体上的力,就其产生原因的不同可分为两类:质量力和表面力。

#### 1. 质量力

亦称之为体积力,是作用于流体每一质点(或微元体积)上的力,其大小与质点质量成正比。质量力包括重力和惯性力。



## 2. 表面力

即作用在所研究的那部分流体表面上的力，通常是指所研究流体以外的流体（或刚体）通过接触面作用在所研究流体上的力。因此表面力不仅指作用于流体外表面上的力——外力，也包括作用在流体内部任一表面上的力——内力，且与流体表面积的大小成正比。表面力包括了与表面垂直的法向力和与表面相切的切向力。

(1) 法向力 既是指各种外力（如大气压力、壁面反力或活塞压力）对流体的作用，也包括一部分流体对另一部分流体的作用，如一部分流体重力对另一部分流体的作用。无论流体处于静止还是运动状态，法向力始终存在，并且根据流体性质只能是压力。

(2) 切向力 是指流体运动时，与刚体表面（如壁面）发生外摩擦或流体质点间发生内摩擦而产生的摩擦力。因此，当流体处于静止（或相对静止）或是理想流体时，切向力不存在而只有法向力作用。

这里必须指出，在流体内部任一接触表面上，彼此间相互作用的表面力是大小相等、方向相反、相互抵消的。因此，在对一个系统进行宏观研究时，表面力可视为内力，对流体的平衡和运动不产生影响。但在流体力学中，常从流体内部取一微元体进行分析研究，这时周围流体对该微元体表面上的作用力，就是外力。明确这一点是十分重要的。

### 思考题及习题

#### 思考题

- 1-1 试从液体和气体内部分子结构说明它们有哪些共同性和哪些不同的性质？
- 1-2 什么是流体？流体与固体的根本区别是什么？
- 1-3 什么是连续介质？研究流体时引入连续介质概念的目的意义何在？
- 1-4 密度与比体积之间有何联系？有何区别？
- 1-5 飞机油箱里装的是汽油，它的密度在地面上和飞向高空后有无变化？为什么？
- 1-6 某物体质量为 2kg，在弹簧秤上称得重力为 19N，则此处的重力加速度数值（单位由自己写）为何值？  
(a) 0.105；(b) 2；(c) 9.5；(d) 19；(e) 以上数值都不对。
- 1-7 什么是液体的压缩性和膨胀性？它们对液体的密度有何影响？
- 1-8 流体的摩擦力与固体的摩擦力有什么根本的区别？
- 1-9 什么是流体的粘性？它对流体运动有什么作用？动力粘度  $\mu$  和运动粘度  $\nu$  有何区别与联系？
- 1-10 为什么气体的粘性随温度的升高而增加？流体的粘性随温度的升高而减小？
- 1-11 观察分析表 1-3 所列几种流体的  $\mu$  和  $\nu$  的数据，自己找出其中的规律。为什么其中水和金属液的运动粘度反比空气的小；这能说明水和金属液的粘性比空气小吗？
- 1-12 什么是理想流体？它与实际流体有何区别？流体力学中引入理想流体概念有什么意义？
- 1-13 作用在流体上的力有哪些？什么情况下没有摩擦力？

#### 习题

- 1-1 已知 500L 水银的质量为 6795kg，求其密度和相对密度。
- 1-2 在海平面处，重力为 20N 的流体，其质量为多少？在重力加速度仅为地球标准重力加速度的 1/7 的地方，该流体的质量和重力各是多少？
- 1-3 封闭在 80L 容器中气体的重力为 60N，求以国际单位制表示的密度和重度数值。
- 1-4 水的  $\rho = 1000\text{kg/m}^3$ ， $\mu = 0.599 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，求它的运动粘度  $\nu$ 。
- 1-5 空气的  $\rho = 1.21\text{kg/m}^3$ ， $\nu = 0.157\text{cm}^2/\text{s}$ ，求它的动力粘度  $\mu$ 。