

高等专科学校试用教材

# 流体力学与传热学基础

牟乃让 主编

机械工业出版社

GAOZHUANJIAOCAI

高等专科学校试用教材

# 流体力学与传热学基础

牟乃让 主编

1978



机械工业出版社

**流体力学与传热学基础**

牟乃让 主编

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本  $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张  $13^{1/2}$ ·字数 326 千字

1984 年 6 月北京第一版·1984 年 6 月北京第一次印刷

印数 00,001—10,500·定价 1.70 元

\*

统一书号: 15033·5690

## 前 言

本书为高等专科学校铸造专业的试用教材，是根据机械工业部教育局初步审定的招收高中毕业生、学制为三年的教学大纲组织编写的。

本书也适用于职工大学、业余大学的热加工专业，全书授课总时数为70学时，中等专业学校也可选用，并可供有关工程技术人员参考。

全书共分两篇（共七章）。第一篇为流体力学基础（共五章），重点讲述流体及其主要力学性质、流体静力学、流体动力学、流体阻力及管路计算和运动物体的阻力及悬浮速度。第二篇为传热学基础（共二章），重点介绍热传递的基本知识，包括热传递的基本方式即导热、对流换热、辐射换热和复合换热及换热器。本书每章之后均附有习题和思考题，其目的在于培养学生运用概念和理论分析解决实际问题的能力。此外，本书还在有关章节中，编入相应的实验内容，这既有利于理论联系实际，也便于各校积极准备和开设实验课。

本书第一篇由牟乃让同志编写，第二篇由韩真善同志编写。主编是牟乃让，主审是沈锦丰。沈锦丰同志还编写了有关实验部分的内容以及“密筋炉胆的换热分析”一节。

本书在编写过程中，参考了原中等专业学校试用教材“流体力学与传热学基础”一书中的有关部分，还引用了一些参考书中的论点、公式、数据和图例，有些事来不及征求各书作者的同意，谨将参考书目列于本书末页，并在此表示歉意和谢忱。编写过程中，杨焕玉和钱崇越两同志对本书提出了许多宝贵的意见，并给予热情的帮助，编者在此表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中不妥之处，希望得到读者的批评和指正。

编者

一九八三年七月于北京

本书采用基本符号及单位表

符号	表示意义	国际单位制		符号	表示意义	国际单位制			
		中文名称	代 号			中文名称	代 号		
A	吸收率			M	质量	公斤	kg		
B	宽度	米	m		质量流量	公斤/秒	kg/s		
		厘米	cm			公斤/时	kg/h		
		毫米	mm			公斤/分	kg/min		
C	常数			N	功率	瓦, 千瓦	W, kW		
	辐射系数	瓦/米 <sup>2</sup> ·开 <sup>4</sup>	W/m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup>	P	力、总压力	牛顿, 千牛	N, kN		
D	直径	米	m	Q	流量	米 <sup>3</sup> /秒	m <sup>3</sup> /s		
		厘米	cm			厘米 <sup>3</sup> /秒	cm <sup>3</sup> /s		
		毫米	mm			升/秒	l/s		
E	透射率				热量	米 <sup>3</sup> /分	m <sup>3</sup> /min		
	能量	焦耳, 千焦	J, kJ			热流量	米 <sup>3</sup> /时	m <sup>3</sup> /h	
F	力	瓦/米 <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	R	半径、当量厚度		焦耳, 千焦	J, kJ	
		牛顿	N			瓦, 千瓦	W, kW		
G	重力、质量力、浮力	千牛	kN		阻力、反作用力	米	m		
		牛/秒	N/s			厘米	cm		
	牛/分	N/min	毫米			mm			
	千牛/时	kN/h	牛顿, 千牛			N, kN			
H	高度、深度、扬程	瓦/米 <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	S	面积	度/瓦	°C/W		
		瓦/米 <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>			米 <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>		
		瓦/米 <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>			厘米 <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>		
I	惯性力	厘米 <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	T	绝对温度	毫米 <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>		
		米	m			开	K		
		厘米	cm			米 <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>		
J	惯性矩	毫米 <sup>3</sup>	mm <sup>3</sup>	V	体积, 容积	厘米 <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>		
		牛顿	N			米, 厘米	m, cm		
		千牛	kN			米/秒 <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>		
K	有效辐射	米 <sup>4</sup>	m <sup>4</sup>	X	湿周	米/秒 <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>		
		厘米 <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>			Y	单位质量力的分量	米/秒 <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>
		毫米 <sup>4</sup>	mm <sup>4</sup>					Z	单位质量力的分量
瓦/米 <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	a	加速度	米/秒 <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>				
L	传热系数	瓦/米 <sup>2</sup> ·度	W/m <sup>2</sup> ·°C		热扩散系数	厘米/秒 <sup>2</sup>	cm/s <sup>2</sup>		
		米/秒 <sup>1/2</sup>	m/s <sup>1/2</sup>			米 <sup>2</sup> /秒	m <sup>2</sup> /s		
L	长度, 射线行程	米	m	b	宽度	米, 厘米, 毫米	m, cm, mm		
		厘米	cm			吸热系数	焦/米 <sup>2</sup> ·度·		
		毫米	mm				秒 <sup>1/2</sup>	J/m <sup>2</sup> ·°C·s <sup>1/2</sup>	
		微米	μm				c	比热	焦/公斤·度
结晶潜热	千焦/公斤	kJ/kg	d	直径	米, 厘米, 毫米		m, cm, mm		

符号	表示意义	国际单位制		符 号	表示意义	国际单位制	
		中文名称	代 号			中文名称	代 号
$d_e$	当量直径	米, 厘米, 毫米	m, cm, mm	$\alpha$	放热系数	瓦/米 <sup>2</sup> ·度	W/m <sup>2</sup> ·°C
$e$	比能	焦/公斤, 米	J/kg, m	$\alpha_c$	对流放热系数	瓦/米 <sup>2</sup> ·度	W/m <sup>2</sup> ·°C
$f$	摩擦系数			$\alpha_r$	辐射放热系数	瓦/米 <sup>2</sup> ·度	W/m <sup>2</sup> ·°C
$g$	重力加速度	米/秒 <sup>2</sup> , 厘米/秒 <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup> , cm/s <sup>2</sup>	$\alpha_s$	复合放热系数	瓦/米 <sup>2</sup> ·度	W/m <sup>2</sup> ·°C
$h$	高度、水头、压头	米, 厘米, 毫米	m, cm, mm	$\beta$	平面角	度, 分, 秒	°, ', "
$h_L$	沿程水头损失	米, 厘米, 毫米	m, cm, mm	$\beta_r$	体积压缩系数		
$h_w$	局部水头损失	米, 厘米, 毫米	m, cm, mm	$\beta_t$	体积膨胀系数	1/开	1/K
$i$	水力坡度			$\gamma$	重度	牛/米 <sup>3</sup> , 千牛/米 <sup>3</sup>	N/m <sup>3</sup> , kN/m <sup>3</sup>
$l$	长度	米, 厘米, 毫米	m, cm, mm	$\delta$	厚度	米, 厘米, 毫米	m, cm, mm
$m$	质量	公斤	kg	$\epsilon$	孔口收缩系数		
$n$	转速	转/分	r/min		粗糙度	厘米, 毫米, 微米	cm, mm, $\mu$ m
$o-o$	基准面自由面			$\eta$	黑度		
$p$	压强	牛/米 <sup>2</sup> (帕) 牛/厘米 <sup>2</sup> 千牛/米 <sup>2</sup>	N/m <sup>2</sup> (Pa) N/cm <sup>2</sup> kN/m <sup>2</sup>	$\theta$	效率		
$P_{at}$	工程大气压	帕	Pa	$\lambda$	平面角	度, 分, 秒	°, ', "
$P_{atm}$	物理大气压	帕	Pa		沿程阻力系数		
$P_0$	液面压强	帕	Pa		导热系数	瓦/米·度	W/m·°C
$q$	热流密度	瓦/米 <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	$\mu$	波长	微米	$\mu$ m
$q_l$	单位管长的热流密度	瓦/米	W/m		动力粘性系数	帕·秒	Pa·s
$r$	半径	米, 厘米, 毫米	m, cm, mm			牛·秒/米 <sup>2</sup>	N·s/m <sup>2</sup>
$S$	距离, 行程	米, 厘米, 毫米	m, cm, mm	$\nu$	流量系数	达因·秒/厘米 <sup>2</sup>	dyn·s/cm <sup>2</sup>
$t$	面积	米 <sup>2</sup> , 厘米 <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> , cm <sup>2</sup>		运动粘性系数	米 <sup>2</sup> /秒 厘米 <sup>2</sup> /秒(斯)	m <sup>2</sup> /s cm <sup>2</sup> /s(st)
$t$	摄氏温度, 度	度	°C	$\xi$	频率	1/秒	1/s
$u$	速度、流速	米/秒, 厘米/秒	m/s, cm/s		局部阻力系数		
$u'$	脉动速度	米/秒, 厘米/秒	m/s, cm/s	$\rho$	返固层厚度	厘米, 毫米	cm, mm
$v$	速度、平均速度	米/秒, 厘米/秒	m/s, cm/s		密度	公斤/米 <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
$v_0$	比容	米 <sup>3</sup> /公斤	m <sup>3</sup> /kg	$\sigma$	表面张力	牛/米	N/m
$v_0$	悬浮速度	米/秒, 厘米/秒	m/s, cm/s		正应力	牛/米 <sup>2</sup> (帕)	N/m <sup>2</sup> (Pa)
$x$	坐标	米, 厘米, 毫米	m, cm, mm	$\tau$	时间	秒, 分, 时	s, min, h
$y$	坐标	米, 厘米, 毫米	m, cm, mm		切应力	巴	bar
$z$	坐标	米, 厘米, 毫米	m, cm, mm	$\varphi$		牛/米 <sup>2</sup> (帕)	N/m <sup>2</sup> (Pa)
	位置水头	米, 厘米, 毫米	m, cm, mm		平面角	度, 分, 秒	°, ', "
$\alpha$	平面角	度, 分, 秒	°, ', "	$\omega$	流速系数		
	动能修正系数				角系数		
	形状修正系数				面积	米 <sup>2</sup> , 厘米 <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> , cm <sup>2</sup>
					角速度	弧度/秒	rad/s

# 目 录

本书采用基本符号及单位表

绪论 ..... 7

## 第一篇 流体力学基础

第一章 流体及其主要力学性质 ..... 3

§ 1-1 流体及其作为连续介质的概念, 流体的性质 ..... 3

§ 1-2 流体的密度、重度及其换算 ..... 5

§ 1-3 流体的压缩性和膨胀性 ..... 6

§ 1-4 粘性和理想流体的概念 ..... 8

§ 1-5 作用在流体上的力 ..... 11

本章思考题及习题 ..... 12

第二章 流体静力学 ..... 13

§ 2-1 流体静压强及其特性 ..... 13

§ 2-2 流体平衡微分方程及等压面 ..... 15

§ 2-3 流体静压强基本方程 ..... 17

§ 2-4 压强表示法 ..... 21

§ 2-5 静止液体的能量和水头 ..... 22

§ 2-6 压强测量法 ..... 24

§ 2-7 液体静压强的传递——巴斯加原理及应用 ..... 27

§ 2-8 作用在平面壁上的液体总压力 ..... 30

§ 2-9 作用在曲面壁上的液体总压力 ..... 33

§ 2-10 气体静力学基础 ..... 39

本章思考题及习题 ..... 43

第三章 流体动力学 ..... 48

§ 3-1 流体动力学的基本概念 ..... 48

§ 3-2 连续性方程 ..... 54

§ 3-3 理想流体的运动微分方程 ..... 56

§ 3-4 非压缩性流体的伯努利方程 ..... 57

§ 3-5 伯努利方程的应用 ..... 66

§ 3-6 稳定流的动量方程 ..... 72

§ 3-7 旋流、势流和涡的概念 ..... 75

§ 3-8 旋涡运动的规律及其应用 ..... 77

§ 3-9 伯努利方程实验 (实验一) ..... 80

§ 3-10 流速和流量的测定 (实验二) ..... 82

本章思考题及习题 ..... 85

第四章 流动阻力及管路计算 ..... 91

§ 4-1 能量损失的两种形式 ..... 91

§ 4-2 流体流动的两种状态 ..... 92

§ 4-3 管内层流运动规律及达西公式 ..... 95

§ 4-4 管内紊流运动及损失计算 ..... 99

§ 4-5 局部损失的形式和计算 ..... 105

§ 4-6 管路的水力计算 ..... 110

§ 4-7 孔口和管嘴的出流 ..... 116

§ 4-8 使炉内气体流动的方法, 通风机和烟囱的选择计算 ..... 123

§ 4-9 雷诺实验 (实验三) ..... 128

§ 4-10 水头损失实验 (实验四) ..... 130

本章思考题及习题 ..... 132

第五章 运动物体的阻力及悬浮速度 ..... 136

§ 5-1 附面层的概念 ..... 136

§ 5-2 运动物体的阻力及阻力系数 ..... 138

§ 5-3 球形物体的自由悬浮速度 ..... 140

§ 5-4 非球体及颗粒群悬浮速度概述 ..... 143

本章思考题及习题 ..... 147

## 第二篇 传热学基础

第六章 热传递的基本知识 ..... 148

§ 6-1 热的传递及其基本方式 ..... 148

§ 6-2 导热 ..... 149

§ 6-3 对流换热 ..... 163

§ 6-4 辐射换热 ..... 174

§ 6-5 固体粒状材料导热系数的测定 (实验五) ..... 187

本章思考题及习题 ..... 188

第七章 复合换热及换热器 ..... 191

§ 7-1 复合换热 ..... 191

§ 7-2 通过平壁及圆筒壁的传热 ..... 191

§ 7-3 换热器的种类及间壁式换热器的构造特点 ..... 197

§ 7-4 间壁式换热器的热计算 ..... 199

§ 7-5 顺流换热器与逆流换热器的比较 ..... 200

§ 7-6 复合换热的应用举例——密筋炉胆的热交换分析 ..... 201

本章思考题及习题 ..... 203

附录 ..... 205

## 绪 论

流体力学和传热学是两门独立的学科，但在高等专科学校一些热加工专业的教学计划中将它们合并作为一门课程开设。这既是因为开课门数和教学时数的限制，也是由于这两门学科之间有密切的联系。

### 一、流体力学与传热学研究的对象

自然界中，在一定条件下，各种物质分别以固体、液体、气体状态存在。液体和气体又统称为流体。关于固体的基本力学问题，我们已在理论力学和材料力学课程中学习过了；而关于流体的基本力学问题，则是流体力学所要研究的。

流体力学是以理论分析和实验研究相结合的方法，研究流体平衡和运动的规律及其与固体之间的相互作用，同时研究如何应用这些规律去解决工程实际问题。

由于流体包括液体和气体，因而流体力学也就包括液体力学和气体力学。液体力学通常以水作为液体的代表，故一般称为水力学。从分析研究液体着手，建立的关于液体的一些基本规律，对于平衡的或运动时速度远低于声速的气体，也是适用的。由于我们将来的工作中，所遇到的流体多为液体，或运动时速度远低于声速的气体，因此本书中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。热力学第二定律指出：只要有温度差存在，热量总是自发地从高温处传向低温处。温度差普遍地出现在自然界里，所以热的传递是一个很普遍的自然现象。传热学的研究对象就是这种热传递过程的规律，并运用这些规律分析解决工程技术中的实际问题。在生产实际中，有时需要增强热量的传递过程；有时则力求削弱热量的传递。例如，在同一座冲天炉上，我们应设法尽量增强焦炭、炉气和金属炉料、铁水之间的热传递；同时又要设法削弱炉内热量向炉壁的传递。前一种情况是为了充分利用热量，后一种情况是为了尽量减少热量损失。我们要提高热量利用率，这是节约能源的重大问题。为达到此目的，就必须对热量传递规律有充分的认识。

### 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得到广泛的应用。例如：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法，抬箱力的计算，冲天炉中炉气的流动，冲天炉供风量及风压的测定，供风管道、局部装置、炉胆及料层的阻力计算，烟囱原理及其计算，造型材料气力输送时关于悬浮速度的计算，水力清砂的高压水枪和水力提升机原理，通风除尘的计算，气动装置和液压传动等等，都需要流体静力学、流体动力学、能量损失和气体动力学等基本理论。

传热学的基本知识在铸造生产中也是非常必要的。例如：熔炼合金用的熔化炉，烘干砂型或型芯用的干燥炉，铸件退火用的退火炉，其中都有传热的分析和计算问题。正确地应用传热学的理论，分析解决这些问题，不但可以有效利用能源，而且也有利于提高产品质量。又如，铸件在铸型中凝固顺序和凝固时间的分析计算，并在传热学的理论指导下，采取措施，加以控制，则既可提高铸件质量，又能节省金属和时间。



### 三、本课程的任务和教学方法

本课程是铸造专业的一门技术基础课。其任务是使学生了解流体的性质，掌握流体平衡和运动时的规律，学习流体阻力和能量损失、运动物体的阻力和悬浮速度、热传递的基本理论知识及其相应的计算，为学习专业课程（铸造工艺学，铸造合金与熔炼，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。要着重于基本概念、基本理论的讲授和理解，力求达到概念正确，掌握牢固。不要把时间过多地用在繁杂的数学推导上。有些内容可以采用分析和讨论的形式，这样做有助于培养学生的思维、分析和解决问题的能力。

要重视实验和直观教学，这既利于学生理解和验证一些比较抽象的理论概念，也有助于培养学生的实践和科研能力。

本书每章之后都附有思考题和习题，思考题是为了明确和加深所学的概念，习题是为了培养计算能力。由于题目数量较多，而学生课外作业时间有限，教师可以从中选择，适量布置。

# 第一篇 流体力学基础

流体力学是一门科学。它是以理论分析和实验研究相结合的方法，研究流体平衡和运动的规律，以及这些规律在工程技术中的应用。

流体包括液体和气体，它们的共同特征是具有“流动性”。这是因为它们的分子之间的引力较小，所以对拉力，对形状的缓慢改变产生的阻力也很微小。由于液体和气体之间存在着这种共同性，因而它们也有相同的规律。本课程所研究的主要对象是这种相同的规律。但是，气体和液体毕竟还有很大的区别，因而在研究其共同规律的基础上，对它们各自的特殊性也予以必要的分析说明。

流体力学分为流体静力学和流体动力学两大部分。前者研究静止流体中的压强分布规律及流体对固体接触面的作用力等问题；后者包括运动学的内容，它研究运动流体的各种运动参数的变化规律及流体与固体接触面的相互作用力等问题。按照它们的内容和顺序，本篇分为五章予以讲述。第一章讲述流体的概念和流体的主要力学性质，因为这些力学性质是决定流体平衡和运动规律的内部原因，是讨论流体的力学规律的基础。第二章流体静力学，研究流体处于平衡时的力学规律，这既有实际意义，同时也是进一步研究流体运动时的必要基础。第三章流体动力学基础，包括流体运动学和流体动力学两个方面，先从研究理想流体出发，推导和讲述基本理论，重点是连续方程、伯努利方程、动量方程及其应用。第四章流动阻力及管路计算，研究实际流体在管路内流动时，因存在粘性而导致流动阻力的规律，正确计算或确定能量损失，解决管路的实际水力计算问题。第五章运动物体的阻力及悬浮速度，分析运动物体阻力产生的原因，着重探讨物体特别是颗粒群的悬浮速度及其计算方法，为专业课程讲述气力输送问题奠定一定理论基础。这五章，既有密切的联系，又分别专门讲述某一部分问题，是按照由浅入深，由简及繁，由基本理论到实际应用的顺序编排的。

## 第一章 流体及其主要力学性质

在研究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。

### § 1-1 流体及其作为连续介质的概念，流体的性质

#### 一、流体的概念

什么是固体？什么是液体？什么是气体？人们很容易从它们的外部表现而分辨出来。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，分子间的距离和相对位置都较难

改变，具有抵抗压力、拉力和切力三种能力，因而在受到不大的作用力时，能保持其体积和形状固定不变。

液体和气体同固体相比，分子排列松散，分子间的引力较小，分子运动较强烈，不能抵抗拉力和切力，因而不能保持一定的形状。它们都是很容易流动的，所以液体和气体统称为流体。

液体和气体具有的共同特性是流动性，它们还有如下的不同特性：

气体很容易膨胀或者被压缩，它没有自由面，总是完全地充满所占容器的空间。由于气体分子之间的距离很大，引力很弱，因此，它既不能保持一定的形状，也不能保持一定的体积。由于气体分子之间的斥力很弱，因而它很容易被压缩。气体分子的自由运动使它能够充满所占容器的空间。

液体在重力作用下有边界（自由）液面，有比较固定的容积，在实用意义上具有不可压缩的特性，但其形状是随容器的形状而改变。这是由于液体分子间的距离比固体分子（或离子）间的距离大，因而引力减弱，不能保持一定的形状；但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。而在受到压缩时，由于分子之间的斥力较大，抵抗压缩，因而具有实用意义上的不可压缩性。

## 二、流体作为连续介质的概念

流体是由分子所组成，而分子之间则是存在空隙的。流体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，掌握整个流体平衡与运动的规律，那是很困难的。因为每一分子的运动都极为复杂，而且即便是一很小的体积，它所包含的分子数目也很可观，要列出这些分子的运动方程式几乎是不可能的。

1753年，欧拉(Euler)建议采用连续介质这一概念来进行流体力学的研究。这就是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，也是可能的。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，是充分小而可忽略不计，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 $2.7 \times 10^{18}$ 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连续的，即既没有空隙也没有分子运动的介质。

还应注意的是，所谓流体的连续性，不仅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。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。

综上所述，可以看出，把流体当作是一种连续介质来处理问题，不仅是必要的，而且也是完全可能的。因此，在今后的研究中，我们即将流体看成是连续介质。这种连续介质本身是由无穷多个连续分布的微小流体团所组成。这种微小的流体团我们称之为流体质点，有时也叫流体微团。

### 三、流体的性质

在流体力学中要考虑到的流体性质有密度、重度、粘性、压缩性、膨胀性、表面张力和蒸汽压等。考虑到本专业的具体需要，将主要讨论前五个性质，后两个性质则从略。

## § 1-2 流体的密度、重度及其换算

### 一、密度

流体和固体一样，也具有质量。单位体积内所具有的质量称为质量密度或简称为密度。常用的符号是  $\rho$ 。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 [kg/m<sup>3</sup>];

$M$ ——流体的质量 [kg];

$V$ ——流体的体积 [m<sup>3</sup>].

对于非均质流体，按上式计算的结果只能表示流体的平均密度。而流体内某一点处的密度可表示为：

$$\rho = \frac{dM}{dV}$$

式中  $dM$ ——包含该点的微元流体体积所具有的质量；

$dV$ ——包含该点的微元流体体积。

在气体力学中，常用“比容”这一物理量，比容是单位质量流体所占据的容积。

对于均质流体，比容  $v$  是密度  $\rho$  的倒数，即

$$v = \frac{V}{M} = \frac{1}{\rho} \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

液体的密度在一般情况下可以认为不随温度或压强而变化；但气体的密度则随温度和压强而发生很大的变化。

### 二、重度

任何物体在地心吸引力作用下，都具有重量。在均质流体中，流体具有的重量与其所占有的容积之比称为重度（或容重），常用  $\gamma$  表示。

若以  $V$  表示所取流体的体积，以  $G$  表示该体积流体的重量，根据定义：

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

国际单位制中用 N/m<sup>3</sup> 表示重度的单位，工程制中则用 kgf/m<sup>3</sup> 为单位。

### 三、密度与重度的关系

根据牛顿第二定律，某物体的重量等于其质量与重力加速度的乘积，即  $G = Mg$ 。于是由式(1-1)及(1-2)得：

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{G}{gV} = \frac{\gamma V}{gV} = \frac{\gamma}{g}$$

或

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

式中  $g$  ——重力加速度，随所处位置的高度而变化。在海平面处， $g = 9.807\text{m/s}^2 = 980.7\text{cm/s}^2$ 。此数值为标准重力加速度。在工程计算中，一般取  $g = 9.80\text{m/s}^2$ 。

表1-1 几种流体的密度（一个标准大气压下）

流体名称	温度(°C)	密度 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	流体名称	温度(°C)	密度 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
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
液压力	15	860~900	二氧化碳	0	1.976

所谓某物质的比重是指该物质的重度与标准状况下水的重度之比，是一个无因次数。但现在的中学物理教材和习惯用语中，常把重度直接称为比重。

根据铸件图纸尺寸，可以计算出铸件的体积  $V$ ，乘以重度  $\gamma$ ，就可算出铸件的重量  $G$ 。这对单件生产大铸件时，浇注之前事先算好铁水需要量是非常重要的。

利用比重的概念，没有芯子的简单铸件的近似重量可用模型的重量计算出来。例如：以松木模型（比重为0.5）制作灰铸铁件（比重为7.0）时，称出模型的重量，然后乘以14(7.0:0.5)，就能得出铸件的重量。

**例1-1** 某流体的重度为  $9200\text{N/m}^3$ ，它所处位置的重力加速度为  $9.81\text{m/s}^2$ 。问这时该流体的密度是多少？若将此流体在不变温度下移至较高的位置，而该处的重力加速度仅为  $9.805\text{m/s}^2$ ，则它的重度和密度有何变化？

**解：**根据式(1-3)

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{9200}{9.81} = 937.8 \text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$$

换算成密度的国际单位，则为  $937.8\text{kg/m}^3$ 。由于质量不变，体积不变，所以移动位置后对密度并无影响。只有重度因重力加速度的变化而发生了变化：

$$\gamma = \rho g = 937.8 \times 9.805 = 9195 \text{ N/m}^3$$

### § 1-3 流体的压缩性和膨胀性

当作用在流体上的压强增加时，流体所占的体积就会减小，流体的这种特性称为压缩性。流体的体积随温度而变化的特性，称为流体的膨胀性。对于液体和气体，这两种性质差别很大，所以要分别加以讨论。

#### 一、液体的压缩性和膨胀性

液体压缩性的大小，以体积压缩系数  $\beta_p$  来表示。也就是在温度不变的条件下，每增加一个工程大气压时，液体体积的相对变化量，即

$$\beta_p = -\frac{dV/V}{dp} \quad (1-4)$$

式中  $dp$ ——压强的增量 [大气压];  
 $V$ ——流体原来所占的体积 [ $m^3$ ];  
 $dV$ ——流体体积的改变量 [ $m^3$ ];  
 $\beta_p$ ——体积压缩系数 [大气压 $^{-1}$ ].

因  $dp$  与  $dV$  的变化方向相反, 故上式中加一负号, 以使  $\beta_p$  为正值。

由实验测知, 液体的体积压缩系数非常小。例如, 水在  $0^\circ\text{C}$  时的压缩系数值只有万分之零点五左右。因此在解决许多实际问题时, 可把液体看成是不可压缩的。只有在研究某些个别问题 (如管中水击现象, 高压造型机的液压传动) 时, 必须考虑液体的压缩性。

液体膨胀性的大小, 以体膨胀系数  $\beta_t$  来表示。也就是在压强不变的情况下, 温度每上升  $1^\circ\text{C}$  时, 液体体积相对增加的数值, 即

$$\beta_t = \frac{dV/V}{dt} \quad (1-5)$$

式中  $dt$ ——温度的增量 [ $^\circ\text{C}$ ];  
 $\beta_t$ ——体膨胀系数 [ $^\circ\text{C}^{-1}$ ].

由实验测知, 液体的体膨胀系数也是非常小的。例如, 水在一个大气压下的体膨胀系数值只有万分之几。因此, 在大多数实际工程计算中, 都不考虑液体的膨胀性。但在某些特殊情况下, 液体的体膨胀是不能忽略的。例如, 对密封在较大容器内的液体来说, 由于热膨胀, 会造成容器的破裂, 故应予以注意。

表 1-2 列举了水在一个标准大气压下, 不同温度 ( $^\circ\text{C}$ ) 时的密度和重度。

表 1-2 一个标准大气压下水的密度和重度

温度( $^\circ\text{C}$ )	密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	重度 [ $\text{kN}/\text{m}^3$ ]	温度( $^\circ\text{C}$ )	密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	重度 [ $\text{kN}/\text{m}^3$ ]
0	999.9	9.806	30	995.7	9.755
2	1000	9.807	35	994.1	9.749
4	1000	9.807	40	992.2	9.731
6	1000	9.807	50	988.1	9.690
8	999.9	9.806	60	983.2	9.645
10	999.7	9.805	70	977.8	9.590
15	999.1	9.799	80	971.8	9.529
20	998.2	9.790	90	965.3	9.467
25	997.1	9.778	100	958.4	9.399

## 二、气体的压缩性和膨胀性

气体的压缩性和膨胀性, 即气体的体积随压强或随温度而变化的情况, 可由一定质量气体的压强、体积、温度三者变化时的相互关系而综合表达之。根据物理课中已学习过的气体状态方程可知: 对于一定质量的理想气体, 当温度不变时, 体积与压强成反比; 当压强不变时, 体积与绝对温度成正比。而实际气体在压强不太大和温度不太低的情况下, 都近似地符合气体状态方程。由此可见, 气体的体积随温度和压强而变化的量是很大的, 即气体具有很大的压缩性和膨胀性。

综合上述, 可知在一般情况下, 液体的压缩性和膨胀性很小, 可以略去不计, 因此其密度和重度也是不变化的, 可以看作常数。这种流体我们称之为不可压缩流体。反之, 如果流体的压缩性和膨胀性比较大, 其密度和重度不能看成是常数, 这样的流体称为可压缩流体。

## § 1-4 粘性和理想流体的概念

在流体的各种性质中，对研究流体流动有重要作用的是粘性。

### 一、粘性的概念

流体抵抗剪切力的能力虽然很弱，但这种能力还是存在的，并且在某些情况（如邻层之间的相对速度较大时）下不能忽略。粘性就是流体对剪切力进行抵抗的能力。各种流体的粘性是极不相同的，水和空气的粘性都很小，而糖浆和柏油的粘性则很大。

图 1-1 示两个相距较近的平行平板，上面的一片以固定的速度值  $V$  向右移动，下面的一片固定不动。两板之间的距离为  $B$ ，其间充满了某种流体。由于在流体边界上和流体内部都不可能没有滑移，则接触下平板的流体必然保持静止；接触上平板的流体则以  $V$  速运动；处于两平板之间的流体必然随高度不同而以连续变化的速度运动。这就表明，相邻流体层之间有相

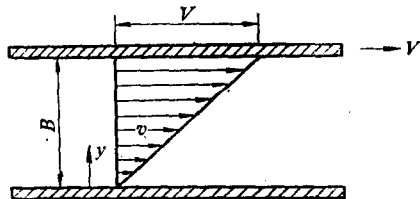


图1-1 速度分布图

对运动，一层运动较快些，一层稍慢些。每一运动较慢的流体层，都是在运动较快的流体层的带动下才运动的。也就是说，因为快层对慢层有一个拖力，使慢层加速，慢层对快层则有一个与拖力大小相等方向相反的阻力，使快层减速。拖力和阻力都作用在相邻两层流体的接触面上。因为这一对力是在流体的内部产生的，所以叫做内摩擦力或粘性阻力。

因此，当流体的各部分之间具有相对运动时，其内部就会产生内摩擦力以阻碍相对运动。流体的这种性质，称为粘性，或称粘滞性。

应当注意的是：当流体是静止的或各部分之间没有相对运动的时候，流体的粘性就不会表现出来，亦即流体的静摩擦力是不存在的。在这方面，流体与固体大不相同。对静止的固体，必须作用以足够的力克服了它的静摩擦力以后，才会开始运动。而流体则不然，由于它没有静摩擦力，所以只要在静止流体上稍加一点剪切力，它就会开始流动。因此我们说流体具有极大的易流动性。

### 二、粘性产生的机理和影响粘性的因素

粘性产生的机理可以用流体内部分子之间的吸引力和分子扩散而造成的动量交换来解释：

1. 分子之间的吸引力造成的粘性：当液体静止时，其内分子处于平衡位置，这时相邻分子之间的吸引力和斥力相平衡。但当邻层之间发生相对运动时，将使分子距离有所增加，这将使相邻分子之间的吸引力和斥力都要减小，但斥力减少的数量多于吸引力减少的数量，所以综合结果表现出来的是吸引力。于是快层分子因有此引力而拖动慢层，而慢层分子则因有此引力而阻滞快层，因而形成了粘性。由于液体分子之间相靠紧密，这种分子之间的吸引力（或称内聚力）较大，所以这是液体粘性产生的主要原因。而对气体来说，由于其分子距离很大，分子间的吸引力很小，所以这一因素对气体的粘性所起的作用也很小。

2. 扩散分子的动量交换造成的粘性：气体的分子，彼此相距较远，而且各分子作不规则的运动，在气体流动时各流层之间互有微观的分子扩散掺混。于是，原在快层中的分子扩散到慢层中时，就会把它所具有的较多的动量交换给慢层，即给慢层以向前的碰撞，形成拖

力而使慢层加速；相反，当原在慢层的分子扩散到快层中时，它原有的动量比快层中分子的动量小，将给快层以向后的碰撞，形成阻力而使快层减速。这就是因分子扩散的动量交换而造成粘性的机理。由于气体中分子彼此相距较远，而分子的不规则运动极为强烈，相邻流层间的分子相扩散较多，所以扩散分子的动量交换是造成气体粘性的主要原因。

流体粘性的大小，首先取决于各流体本身的性质，如糖浆的粘性就比水的粘性大得多。其次，同一流体因其所处状态不同，粘性也会有变化。在一般的压强下，粘性不随压强而变化；但在压强很大时，气体和大部分液体的粘性随压强的不同而有不规则的变化。气体的粘性随温度的升高而增大，但液体的粘性却随温度的升高而减小。这种在温度影响下的变化可用上述粘性产生的机理来解释：因温度升高时，液体的内聚力将减小，故使其粘性减小；而气体在温度升高时，其分子的不规则运动加强，扩散掺混增加，所以其粘性将增大。

### 三、牛顿内摩擦定律和粘性系数

流体内部有相对运动时，在相邻的快层与慢层的接触面上就会产生摩擦力，称为流体的内摩擦力。这种内摩擦力的大小如何确定呢？牛顿（Newton）经过长期的实验研究，于1686年总结出了关于确定流体内摩擦力的牛顿内摩擦定律：

当流体作层状流动时，流层之间的内摩擦力的大小由下列因素决定：

- (1) 在一般的压强下，与流体内相邻两层间的压强大小无关；
- (2) 与两层流体的接触面积  $S$  成正比；
- (3) 与两层流体的速度梯度  $\frac{du}{dy}$  成正比；
- (4) 与流体的物理性质有关。

由此可见，流体的内摩擦定律和固体之间的摩擦定律是大不相同的。固体之间的摩擦力是与正压力成正比的，而且几乎与接触面积大小和相对速度无关。

牛顿内摩擦定律的数学表达式为：

$$F = \mu S \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

而单位面积上的摩擦力（切应力）为：

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

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>]；

$\frac{du}{dy}$ ——流体沿法线方向的速度梯度 [s<sup>-1</sup>]；

$\mu$ ——表征流体粘性大小的一个系数，它的单位在国际制中用 N·s/m<sup>2</sup>(Pa·s)，在绝对单位制中常用 dyn·s/cm<sup>2</sup>。因为它具有动力学的单位，故称为动力粘性系数。

气体和稀薄液体的动力粘性系数  $\mu$  不随速度梯度  $\frac{du}{dy}$  变化，即摩擦切应力  $\tau$  和速度梯度之间存在着直线关系（在公式(1-7)中的  $\mu$  为常数），此种流体称为牛顿流体。在工程问题中



所遇到的大部分流体（空气、水、油为例）都是牛顿流体，这就使研究和计算较为简便。而有些粘稠的流体，如血液、油漆、印油等，它们的粘性系数  $\mu$  随速度梯度而变化，这种流体称为非牛顿流体。

在流体力学中，经常遇到动力粘性系数  $\mu$  和流体密度  $\rho$  的比值，这个比值通常用  $\nu$  来表示，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-8)$$

对于不可压缩的流体，其密度  $\rho$  是一常数，因此  $\nu$  的数值与  $\mu$  的数值成正比。

$\nu$  与  $\mu$  都是表示流体粘性大小的。 $\nu$  的单位是  $\text{m}^2/\text{s}$  或  $\text{cm}^2/\text{s}$ （称为“斯”）。因为它具有运动学的单位，故称为运动粘性系数。

应当注意，切应力  $\tau$  是成对出现的，它的方向应这样确定：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。

对于所有的液体，可以认为当温度增加时其粘性系数减小。例如，对于水，它的  $\mu$  与温度  $t$  之间大致符合下列关系：

$$\mu = \frac{0.0178}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \text{ dyn}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$$

提高浇注温度就会增加铁水的流动性，其主要原因就是由于温度的提高使铁水的粘性下降了。

虽然气体的动力粘性系数比液体的小得多，但气体的运动粘性系数往往会比许多液体的大，这是由于气体的密度比液体的低很多的缘故。因为气体的密度随压强的增加而增大，所以气体的运动粘性系数将随压强的增加而减小。

表1-3 列举了几种流体在一个标准大气压下，不同温度时的动力粘性系数和运动粘性系数的数值。

表1-3 几种流体的  $\mu$ 、 $\nu$  值（在一个标准大气压下）

流体种类	温度 $t$ (°C)	动力粘性系数 $10^6 \cdot \mu$ [N·s/m <sup>2</sup> ]	运动粘性系数 $10^6 \cdot \nu$ [m <sup>2</sup> /s]	流 体 种 类	温度 $t$ (°C)	动力粘性系数 $10^6 \cdot \mu$ [N·s/m <sup>2</sup> ]	运动粘性系数 $10^6 \cdot \nu$ [m <sup>2</sup> /s]
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 (3.0% C)	1300
10		17.70	14.21	1400	3500		0.51
20		18.20	15.12	灰铸铁 (3.3% C)	1300	3760	0.54
30		18.65	16.04		1400	3450	0.51
40		19.12	16.98	铸 钢	1500	2800	0.40
60		19.97	18.80		1700	1900	0.27