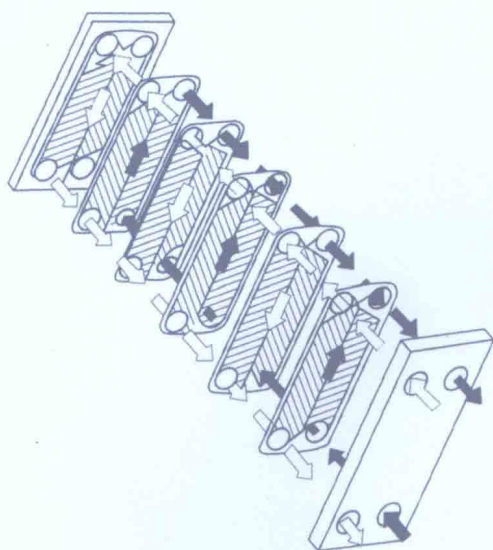


高等学校规划教材

GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

材料传输工程基础

王振峰 编著



冶金工业出版社

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

高等学校规划教材

材料传输工程基础

王振峰 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2008

内 容 提 要

本教材以动量传输、热量传输、质量传输现象相似为着眼点,打破传统教学流体力学、传热学和传质学的界限,从物理、数学的角度阐明三种传输现象。本教材按64~76讲授学时编写,共分4篇15章,第1篇按16~20学时编写,讲授流体动量传输现象及规律和工程技术应用;第2篇按28~34学时编写,讲授导热、对流换热和辐射换热的基本概念和规律;第3篇按6~8学时编写,讲授质量传输现象及规律;第4篇按12~18学时编写,讲授“三传”原理在窑炉工程技术方面的应用,以及与窑炉密切相关的燃料及燃烧知识。

本教材涵盖流体力学、传热、传质、燃烧、窑炉工程基础等方面的知识,可作为高等学校材料科学与工程、材料成形与控制专业本科生的专业基础课程或相关课程的教材,也可作为研究生和教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

材料传输工程基础/王振峰编著. —北京:冶金工业出版社, 2008. 12

高等学校规划教材

ISBN 978-7-5024-4610-9

I. 材… II. 王… III. 材料科学—热工学—高等学校—教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 168619 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 刘小峰 美术编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4610-9

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2008 年 12 月第 1 版, 2008 年 12 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 22.5 印张; 600 千字; 345 页; 1-3000 册

42.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010) 65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

本着重视基础、突出重点、淡化专业的原则，根据教育部新的专业目录设置，编写本教材。本书以动量传输、热量传输、质量传输现象相似为着眼点，打破传统教学流体力学、传热学和传质学的界限，从物理、数学的角度阐明三种传输现象。全书采用先讲授基本概念、其次讲述传输现象的数学物理方程、最后讲述传输理论在工程技术方面应用的层次结构，循序渐进，以便于理解。每篇最后附有思考题和习题，以加深、巩固学生对课程知识内容的掌握。本书附录给出了传输现象和传输理论方面的中英文词汇对照表以及一些物性数据表，以供查阅。

本书涵盖流体力学、传热、传质、燃烧、窑炉工程基础等方面的知识，可作为高等学校材料科学与工程、材料成形与控制专业本科生的专业基础课程或相关课程的教材，也可作为研究生和教师的参考书。本教材按64~76讲授学时编写，共分4篇15章，各篇章内容及学时分配如下：第1篇按16~20学时编写，讲授流体动量传输现象及规律和工程技术应用；第2篇按28~34学时编写，讲授导热、对流换热和辐射换热的基本概念和规律；第3篇按6~8学时编写，讲授质量传输现象及规律；第4篇按12~18学时编写，讲授“三传”原理在窑炉工程技术方面的应用，以及与窑炉密切相关的燃料及燃烧知识。为扩大本书对不同专业、不同层次读者的适应性，采用章节加“※”的办法，以便根据课程设置情况选用。

本书在编写过程中，参考了相关教材及专著，全书由郑州大学王振峰编写，其中附录、思考题、习题部分由华北水利学院王岚编写，郑州大学谭伟对部分习题进行了订正，在编写过程中还得到了郑州大学刘蒲及郑州大学材料科学与工程学院的帮助和支持。在此一并衷心感谢。

受编者水平所限，书中不当之处在所难免，敬请读者和专家指正。

编 者
2008年6月

主要符号表

a	加速度, m/s^2 热扩散率, m^2/s	M	摩尔质量, kg/mol ; 动量, $\text{N} \cdot \text{s}$
A	面积, m^2 ; 吸收率	n	质量通量密度 (相对于静止坐标), $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
b	蓄热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{1/2})$; 宽度, m	N	摩尔通量密度 (相对于静止坐标), $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
c	物质的量浓度, mol/m^3	p	压强, Pa 或 N/m^2
c	质量热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 辐射系 数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; 光速	p_a	大气压强, Pa 或 N/m^2
c_p	质量定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	P	压力, N
c_v	质量定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	q	热流密度 (热通量), W/m^2
d	直径, m	Q	热流量, W ; 体积流量, m^3/s
d_e	当量直径, m	r	半径, m
D	直径, m ; 扩散系数, m^2/s ; 自扩 散系数, m^2/s	R	摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; 水 力半径, m ; 冲击力, N ; 辐射反射 率
D_e	互扩散系数, m^2/s	R_λ	热阻, $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$
e	自然对数的底	t	时间, s ; 温度, $^\circ\text{C}$
E	比能, J ; 辐射能量, W/m^2	T	绝对温度, K 或 $^\circ\text{C}$
F	力, N	U	内能, J ; 无量纲速度
g	重力加速度, m/s^2	v	质量体积, m^3/kg ; 速度, m/s
G	重力, 总量, N ; 总辐射强度, W/m^2	V	体积, m^3 ; 无量纲速度
H, h	高度, m ; 对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	w	质量分数; 速度, m/s
h_v	摩擦阻力损失, J/m^3 或 J/kg	W	质量力, N
h_l	沿程水头损失, m 流体桩或 J/m^3	x, y, z	坐标
h_r	局部水头损失, J/m^3 或 m 流体	x	摩尔分数
I	辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$	X	单位质量力 x 轴分量, N
J	有效辐射, W/m^2 ; 摩尔通量, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	α	辐射换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
k	传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	γ	重度, N/m^3
K	局部阻力系数	κ_T	等温压缩率, Pa^{-1}
l	分子平均自由程, m	δ	厚度 (或边界层厚度), m
L	厚度或特征长度, m	Δ	绝对粗糙度, m
m	质量, kg ; 摩尔质量, kg/mol ;	ε	发射率 (黑度系数), %
		μ	动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
		θ	角度, 过剩温度
		Θ	无量纲温度
		λ	沿程阻力系数; 热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot$

	K); 辐射波长, m		$Ho = \frac{v\tau}{L}$, 均时性数
ν	运动黏度 (动量扩散系数), m^2/s		$Le = \frac{\alpha}{D}$, 路易斯数
ρ	密度, kg/m^3 ; 热辐射反射比, %		$Ma = \frac{v}{c}$, 马赫数
σ	正应力 (或表面张力), Pa; 斯忒藩-玻耳兹曼常数, $W/(m^2 \cdot K^4)$		$Nu = \frac{hL}{\lambda}$, 努塞尔数
τ	剪应力, Pa; 热辐射透射比, %; 曲折因数; 时间		$Pe = RePr = \frac{uL}{a}$, 贝克来数
Φ	热流量, W		$Pr = \frac{\nu}{a}$, 普朗特数
φ	角度; 角系数; 体积分		$Re = \frac{uL}{\nu}$, 雷诺数
ω	孔隙度; 角速度		$Sc = \frac{\nu}{D}$, 施密特数
$Ar = \frac{gl^3}{\nu^2} \frac{\rho - \rho_0}{\rho}$	阿基米德数		$Sh = \frac{k_c L}{D}$, 舍伍德数
$Bi = \frac{h\delta}{\lambda}$	毕渥数		$St = \frac{Nu}{RePr} = \frac{h}{\rho u c_p}$, 斯坦顿数
$Eu = \frac{p}{\rho v^2}$	欧拉数		$St^* = \frac{Nu}{ReSc} = \frac{k_c}{u}$, 传质斯坦顿数
$Fo = \frac{a\tau}{L^2}$	傅里叶数		$We = \frac{\rho v^2 l}{\sigma}$, 韦伯数
$Fr = \frac{gL}{v^2}$	弗劳德数		
$Ga = \frac{gL^3}{\nu^2}$	伽利略数		
$Gr = \frac{g\alpha\Delta TL^3}{\nu^2}$	格拉晓夫数		

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	定价 (元)
冶金传输原理基础	49.00
冶金传输原理	40.00
冶金传输原理	26.00
传输过程基本原理	46.00
传输理论和计算	24.00
传递现象基础	29.00
冶金过程数值模拟基础	28.00
冶金中单元过程和现象的研究	96.00
冶金过程数值模拟分析技术的应用	65.00
传热学 (第2版)	29.50
燃料及燃烧 (第2版)	29.50
热能转换与利用 (第2版)	32.00
熔融盐循环热载体无烟燃烧技术基础	20.00
高性能复合相变蓄热材料的制备与蓄热燃烧技术	30.00
材料热工基础	40.00
冶金热工基础	36.00
冶金炉热工基础 (第2版)	29.50
冶金炉热工基础	50.00
热工基础与工业窑炉	26.00
无机非金属材料工业窑炉	26.00
加热炉计算机辅助设计基础	16.00
硅酸盐工业热工过程及设备	40.00
工业炉砌筑施工操作技术	36.00
炉窑衬砖尺寸设计与辐射形砌砖计算手册	79.00
化工过程及设备	38.00
热工测量仪表 (第2版)	26.00
热工测量仪表	38.00
热工检测仪表	20.00
热工仪表及其维护	26.00
热工实验原理和技术	25.00
无机材料工艺学	69.00
无机非金属材料实验教程	30.00
无机非金属材料实验技术	28.00
冶金工程设计·第1册·设计基础	145.00
冶金工程设计·第2册·工艺设计	198.00
冶金工程设计·第3册·机电设备与工业炉窑设计	195.00
炼钢氧枪技术	58.00
转炉炼钢功能性辅助材料	40.00

目 录

第 1 篇 动量传输

1 流体的性质和流动的基本概念	1
1.1 流体的概念及物理性质	1
1.1.1 什么是流体	1
1.1.2 流体的密度、质量体积	2
1.1.3 流体中的作用力和压强	2
1.1.4 流体的黏度和牛顿黏性定理	4
1.1.5 流体的分类	5
1.2 流体的流动类型	6
1.2.1 稳态流动与非稳态流动	6
1.2.2 层流流动和紊流流动	7
1.2.3 不可压缩和可压缩流动	8
1.2.4 动量传输的研究内容及分类	9
2 流体流动的数学物理方程	10
2.1 流体的连续介质假设	10
2.2 流体流动的描述	11
2.3 流体运动的基本概念	11
2.3.1 迹线	11
2.3.2 流线	12
2.3.3 流管和流束	13
2.3.4 流量和流速	13
2.3.5 流场和流函数	14
2.4 流体静力学方程	14
2.5 描述流体运动的基本方程	15
2.5.1 控制体	16
2.5.2 控制体物理量的数学描述	16
2.6 质量守恒方程——连续性方程	18
2.6.1 直角坐标系的连续性方程	18
2.6.2 一维总流的连续性方程——连续性方程的积分形式	19
2.7 理想流体流动动量守恒方程——欧拉方程	20

2.8	实际流体流动动量守恒方程——纳维—斯托克斯方程	21
2.9	理想流体流动能量守恒方程——伯努利方程	23
2.9.1	欧拉方程在稳定条件下沿流线积分	23
2.9.2	欧拉方程在稳态有势流动情况下的积分	24
2.10	流体流动冲量方程	25
3	流体流量和压强的测量原理	27
3.1	毕托管测压测速原理	27
3.2	孔板流量计测压测速原理	28
3.3	文丘里管流量计测压测速原理	29
4	相似原理和量纲分析	30
4.1	相似的基本概念	30
4.1.1	运动相似	31
4.1.2	动力相似	31
4.2	流体流动过程中相似准数的导出	32
4.2.1	相似准数的导出	32
4.2.2	相似准数的意义与性质	34
4.3	相似三定律	34
4.3.1	相似第一定律	34
4.3.2	相似第二定律	34
4.3.3	相似第三定律	35
4.4	量纲分析	35
4.4.1	量纲	35
4.4.2	量纲表达式	36
4.4.3	量纲和谐原理	36
4.4.4	相似准数的转换	37
4.5*	模型研究法	39
4.5.1	模型相似条件	39
4.5.2	近似模型法	40
4.5.3	流体流动的稳定性与近似模拟	40
4.5.4	模型设计	40
4.5.5	实验结果处理	41
5	流体流动的机械能衡算与阻力损失	42
5.1	流体流动的机械能衡算	42
5.2	流体流动的能量损失	43
5.2.1	沿程阻力损失	43
5.2.2	局部阻力损失	43
5.2.3	总阻力损失	43

5.3*	管内流动速度分布与流动阻力	43
5.3.1	层流管内速度的分布	44
5.3.2	湍流管内速度的分布	45
5.3.3	流体流动阻力的计算	46
5.3.4	圆形直管内的流动阻力	46
5.4*	局部阻力损失计算	47
5.4.1	突然扩张时的局部阻力损失	47
5.4.2	逐渐扩张时的局部阻力损失	49
5.4.3	突然收缩时的局部阻力损失	49
5.4.4	气流改变方向时的局部阻力损失	49
5.5*	流体绕过单个颗粒的阻力计算	50
5.6*	特殊阻力引起的阻力损失计算	50
5.6.1	通过蓄热室格子砖时的阻力损失	50
5.6.2	通过管束时的阻力损失	51
5.6.3	通过散料层时的阻力损失	52
5.6.4	通过文氏管时的阻力损失	55
5.6.5	供气管道和排烟烟道内的阻力损失	57
	动量传输思考题	61
	动量传输习题	61

第 2 篇 热量传输

6	热量传输的基本方式	66
6.1	传热的基本概念	66
6.1.1	温度场	66
6.1.2	等温面与等温线	66
6.1.3	温度梯度	67
6.1.4	热流密度矢量	67
6.2	热量传递的基本方式	67
6.2.1	热传导	68
6.2.2	热对流	69
6.2.3	热辐射	70
6.2.4	综合传热	71
7	导热	74
7.1	导热基本定律	74
7.2	热导率	75
7.2.1	固体的热导率	76
7.2.2	液体的热导率	77

7.2.3 气体的热导率	77
7.3 导热微分方程及其单值性条件	77
7.3.1 导热微分方程式的导出	77
7.3.2 导热微分方程式的单值性条件	80
7.4 稳态导热的分析解法	83
7.4.1 平壁的稳态导热	83
7.4.2 圆筒壁的稳态导热	87
7.4.3 球壁的稳态导热	89
7.5 非稳态导热	90
7.5.1 一维非稳态导热问题的分析解	91
7.5.2 非稳态导热的图算法 (诺模图)	95
7.5.3 特殊多维非稳态导热的简易求解方法	98
7.5.4 集总参数法	99
7.6* 导热问题的数值解法基础	102
7.6.1 有限差分法的基本原理	103
7.6.2 节点温度差分方程组的求解方法	105
8 对流换热	107
8.1 牛顿冷却公式与对流换热系数	107
8.1.1 牛顿冷却公式	107
8.1.2 对流换热的影响因素	107
8.1.3 对流换热的主要研究方法	109
8.2 对流换热的数学描述	110
8.2.1 对流换热微分方程组及其单值性条件	110
8.2.2 边界层理论与对流换热微分方程组的简化	113
8.3 外掠等壁温平板层流换热分析解法	117
8.3.1 外掠平板层流换热分析结果	117
8.3.2 对流换热准数方程	119
8.3.3 动量传递与热量传递的比拟	121
8.4 自然对流换热	123
8.4.1 自然对流换热的数学描述	124
8.4.2 大空间自然对流换热准数方程	128
8.5 强制对流换热	131
8.5.1 管内强迫对流换热	131
8.5.2 外掠壁面强迫对流换热	138
8.6* 相变换热	143
8.6.1 凝结换热	143
8.6.2 沸腾换热	148
8.6.3 热管的工作原理	151

9 辐射换热	153
9.1 热辐射理论基础	153
9.1.1 辐射换热的基本概念	153
9.1.2 黑体辐射的基本定律	155
9.1.3 实际物体表面的辐射——灰体	157
9.1.4 [*] 气体辐射	161
9.2 辐射换热计算	167
9.2.1 角系数	167
9.2.2 黑体表面之间的辐射换热	172
9.2.3 漫灰表面之间的辐射换热	172
9.3 辐射换热的应用	177
9.3.1 遮热板的原理	177
9.3.2 辐射换热系数	180
9.3.3 [*] 太阳辐射与太阳能利用	181
热量传输思考题	184
热量传输习题	185

第3篇 质量传输

10 质量传输基本概念及定律	190
10.1 质量传输基本概念	190
10.1.1 浓度	190
10.1.2 分子传质的速度与通量	190
10.2 菲克定律	191
10.2.1 菲克定律表达式	191
10.2.2 分子扩散系数	191
10.3 对流传质	193
11 传质微分方程	194
11.1 传质微分方程的推导	194
11.2 方程的简化	195
11.3 常见的边界条件	196
11.4 稳态分子传质	196
11.4.1 通过静止气膜的扩散	196
11.4.2 伴随有化学反应的稳态扩散	198
11.5 非稳态分子传质	199
12 对流传质	201
12.1 对流传质的基本概念	201

12.2 动量、热量和质量传输的类比	202
12.2.1 雷诺类比	203
12.2.2 普朗特类比	203
12.2.3 卡门类比	203
12.2.4 奇尔顿-科尔伯思类比	203
12.3 对流传质系数的准数方程	205
12.3.1 平板	205
12.3.2 单个球体	205
12.3.3 管内对流传质	206
质量传输思考题	207
质量传输习题	207

第4篇 窑炉工程基础

13 窑炉系统内的气体流动	209
13.1 不可压缩气体的流动	209
13.1.1 气体从窑炉内的流出和吸入	209
13.1.2 分散垂直气流法则	212
13.2* 可压缩气体的流动	213
13.2.1 声速和马赫数	213
13.2.2 可压缩气体通过渐缩喷嘴流出	214
13.3 烟囱	221
13.3.1 烟囱的工作原理	221
13.3.2 烟囱的热工计算	222
13.4* 喷射器	227
13.4.1 喷射器的分类和构造	227
13.4.2 喷射器的工作原理	228
13.4.3 喷射器的参数方程	228
13.4.4 喷射器的效率分析及合理尺寸的确定	230
14 燃料及其燃烧	234
14.1 燃料的分类及性质	234
14.1.1 燃料的分类	234
14.1.2 燃料的组成及表示方法	234
14.2 燃料的热工性质及选用原则	238
14.2.1 发热量(热值)	238
14.2.2 其他热工性质	241
14.2.3 燃料的选用原则	246
14.3 燃烧的基本概念	247

14.3.1	着火温度	247
14.3.2	着火浓度范围	248
14.3.3	火焰的性质及刚度	248
14.3.4	火焰传播速度	249
14.3.5	燃烧的脱火和回火现象	251
14.3.6	燃料燃烧机理	253
14.4	燃烧计算	257
14.4.1	计算的目与内容	257
14.4.2	空气量、烟气量及烟气组成的计算	257
14.4.3	燃烧温度的计算	268
14.5	燃烧设备及其工作原理	273
14.5.1	气体燃料燃烧设备工作原理	273
14.5.2	液体燃料燃烧设备工作原理	276
14.5.3	固体燃料燃烧设备工作原理	282
15	窑炉系统热交换与余热回收	289
15.1	窑炉系统热交换	289
15.1.1	壁面与流体之间的复合换热	289
15.1.2	流体之间通过器壁的换热	290
15.1.3	窑炉内空间的换热	293
15.2*	窑炉余热回收器	299
15.2.1	间壁式余热回收器	300
15.2.2	间壁式余热回收器的传热计算	302
15.2.3	传热的强化与削弱	307
15.2.4	蓄热式余热回收器	309
15.2.5	热管式余热回收器	315
	窑炉工程基础思考题	320
	窑炉工程基础习题	320
附 录		322
附录 I	常见工程流体的黏度	322
附录 II	常用物质的热导率	324
附录 III	某些材料的发射率	326
附录 IV	某些体系的扩散系数	327
附录 V	空间表面间辐射角系数的计算公式	329
附录 VI	常见燃料成分及发热值	333
附录 VII	常见物质的密度及其他物理性质	334
附录 VIII	常见术语汉英对照表	338
参考文献		345

第1篇

动 量 传 输

动量传输主要是研究流体运动力学及现象的理论，有着广泛的应用背景，已成为整个工程学和应用科学研究的核心和基础之一。泵、压缩机、热交换器、喷气发动机和火箭发动机等流体机械的研究，使得流体力学对于机械工程师来说也是很重要的。作为研究空气绕物体流动的空气动力学，则是从事飞机、导弹和火箭设计的航空航天工程师的基本工具。在气象学、水利学和海洋学中，大气和海洋都是流体，因此对流体的研究也是基础。在现代工程中，动量传输也就是传统上的流体力学，它与古典学科结合起来形成许多新兴学科，例如流体力学与电磁理论结合成一门磁流体动力学。在新型能量转换装置以及恒星和电离层的研究中，磁流体动力学是至关重要的基础。同样，窑炉内气体运动和管道内气体的流动规律对于材料工艺工程师是非常重要的。

由此可见，对于当代的科学家和工程师而言，很好地熟悉流体的动量传输理论是必不可少的。本书中，对于大多数基本概念，我们都用实例加以介绍。一旦掌握了这些基础，读者就可以去阅读更为专门的书籍和研究文献，增进对流体动量传输的特定专题理解。无论如何，在进行更高级的科学和工程技术研究之前，先打下牢固的基础是极为重要的，也是一条永恒的原则。

1 流体的性质和流动的基本概念

1.1 流体的概念及物理性质

1.1.1 什么是流体

研究物体运动的动力学分为两个部分——刚体动力学和变形体（非刚体）动力学。变形体动力学又分为两类——弹性（弹性固体）力学和流体力学。因为现实世界中大部分物体处于流体状态，所以工程师和科学研究者就要对流体有所了解，首先要了解什么是流体，流体与弹性固体（例如钢棒）有什么区别？

简单地说，流体没有运动是不能反抗剪力或剪应力作用的，而固体在没有运动的条件下，也能反抗剪力或剪应力的作用。流体通常又分为液体和气体。液体的分子间有凝聚力，所以有一定的体积，但是没有确定的形状。注入任何容器的液体，都将在容器内填满一个与液体自身

体积相同的空间，而与容器的形状无关。液体的可压缩性很小，其密度随温度和压强的变化也很小。然而，气体则是由大量运动着的分子组成，分子之间相互碰撞，不断扩散。气体没有确定的体积和形状，气体会充满它所注入的任何容器。对于一定量的气体或者一个气体系统，其压强、温度和体积之间存在一定的关系，即气体的物态方程。

1.1.2 流体的密度、质量体积

正像普通物理学研究问题有质点模型、刚体模型一样，研究流体的流动也应该有一种模型，这就是下面要介绍的连续介质模型。为了引入方便，先介绍流体的密度与质量体积（比容）的概念。在流体中任取一小体积 ΔV ，所具有的质量为 ΔM ， P 为 ΔV 内的任一点，如图 1-1 所示，体积 ΔV 内的平均流体密度为：

$$\bar{\rho} = \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (1-1)$$

围绕着 P 点把 ΔV 逐渐缩小，则 ΔM 也随之相应减小。当 ΔV 缩小到某个临界值 ΔV_c 以后， ΔM 与 ΔV 的比值将会产生随机的变化，

这是因为当 ΔV 小于某个临界值 ΔV_c 以后， ΔV 内包含的总分子数与由于分子的热运动单位时间从 ΔV 内溢出的分子数相比不再是一个非常大的值，分子的热运动就会导致 ΔV 内的平均密度不是一个定值，这一比值不再具有宏观的物理意义。为此我们定义流体的密度为：当 ΔV 无限地趋于临界体积 ΔV_c 时， ΔV 内所包含的质量与之体积之比为流体在 P 点处的密度，用公式表示为：

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

这里用到的 ΔV_c 指临界体积，它是宏观上无限小而微观上足够大的一个体积，对不同的流体其值也不尽相同。在物理上有时还常用到另一个物理量——质量体积，它的定义是密度的倒数，即：

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

1.1.3 流体中的作用力和压强

流体中的作用力一类为作用在流体体积内流体质点上的力，称为体积力；如重力、离心力、带电流体受到的电磁力等。另一类为作用在流体表面上的力，称为面积力；如压强、剪应力、黏性力、摩擦力、表面张力等。

压强定义是作用在浸没于流体中物体表面上单位面积上的法向压缩力（正应力）。或单位面积上的表面力：

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA} \quad (1-4)$$

在国际单位制中，压强的单位定义为 N/m^2 或者 Pascal（帕斯卡），记作 Pa（帕）。 $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$ 。因为 1Pa 压强非常小，所以，常用的压力单位是 kPa 和 MPa。为了对国际单位制中的压强大小有一个感性认识，1 个工程大气压强（at）约为 98066.5Pa；1 个标准大气压（atm）等于 101325Pa。

有时工程上压强常用 mmHg、mmH₂O 表示。根据测量基准的不同有绝对压强和相对压强之分；相对压强通常称为表压强，简称为表压。在许多问题中，重要的只是压强差，所以表压

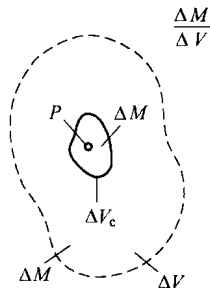


图 1-1 动量传输模型

用起来很方便。但是经常也要用到绝对压强，例如在作为理想气体定律的物态方程中就是这样。所以在应用中，一定要注意加以区分。绝对压强、表压强和真空度之间的关系如图 1-2 所示。

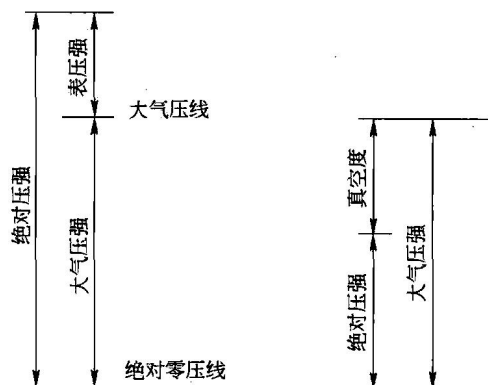


图 1-2 绝对压强、表压强和真空度之间的关系

定义压强可以通过浸没于流体中单位立方体（单位尺度）表面上作用力来测量。我们必须设想该立方体不会干扰流体，所以，流体中一点的实际压强是作用在该立方体表面上的力除以表面面积，而且是当该表面面积趋于无穷小时的极限。在静止的流体中，一点的压强是各向同性的，即立方体各个面上的压强都相同，而且不管该立方体在空间的取向如何，各个面上的压强也都相同。这种各向同性的压强称为流体的静压。这也是热力学中所用的压强（气体定律），而且是热力学的特性之一。如果流体中的压强随空间的位置不同而变化，则在任何固定的流体体积上将存在一个净压力，一定要由某个体力来平衡，例如重力。否则，净压力将使流体产生加速度，导致流体流动。

让我们来考察一个盛有静止液体的容器。设想从中取一小块液体体积，由于它没有加速度，因此受到的合力为零。为了说明问题，我们特别选择如图 1-3 所示的一个体积元。

因为流体中没有相对运动，于是流体中的剪应力应该处处为零。唯一作用在体积元上的表面力沿表面的法向（压强）。同时，唯一的体积力来自地球的重力场，沿着 y 的负向。因此，我们得出 x 方向的合力为：

$$p_2 dy dz - p_3 dz ds \sin \alpha = 0$$

其中， $ds \sin \alpha = dy$ ，因此， $p_2 = p_3$ 。在 y 方向上：

$$p_1 dx dz - p_3 dz ds \cos \alpha - \frac{1}{2} \rho g dx dy dz = 0$$

其中， ρ 为流体的质量密度，且有 $ds \cos \alpha = dx$ ，给出：

$$p_1 - p_3 - \frac{1}{2} \rho g dy = 0$$

因为上式第三项远小于前面两项，所以：

$$p_1 = p_2 = p_3$$

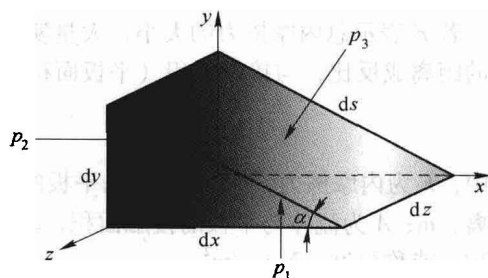


图 1-3 作用在流体体积元上压力的平衡